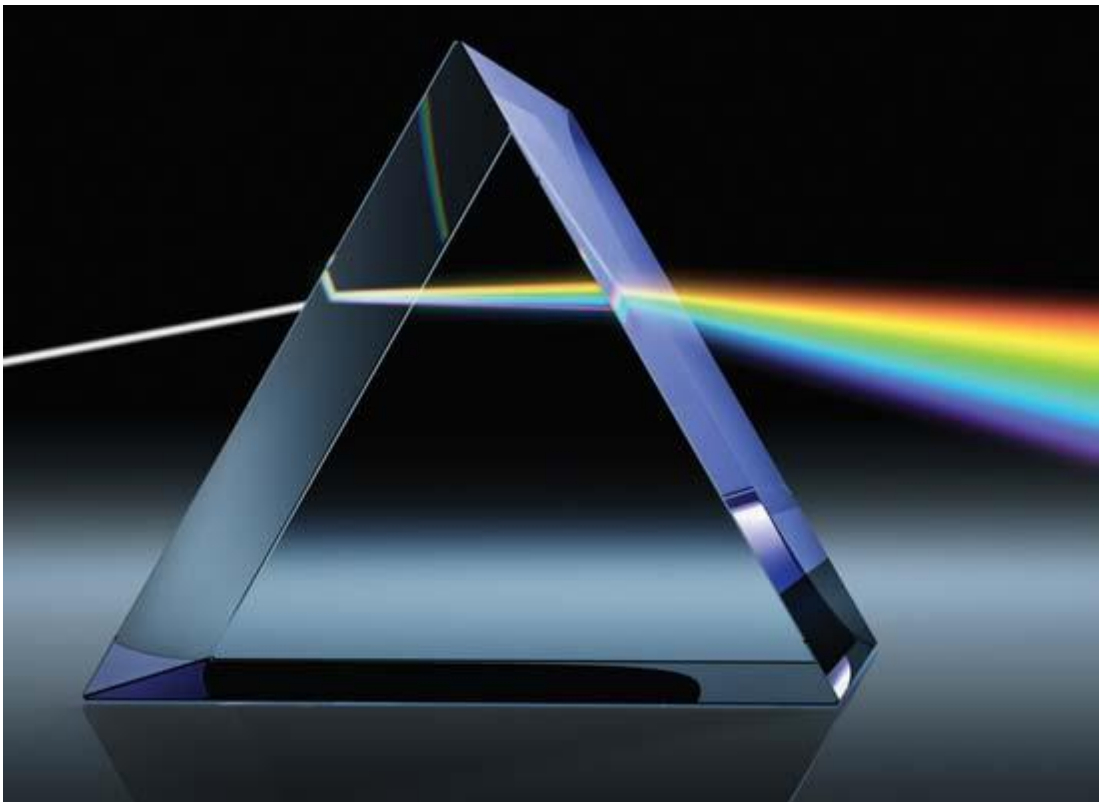




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ
ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ Κ
ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΒΑΘΜΙΑΣ



Βασίλειος Μπίστας

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπουσα:

Ευαγγελία Λάμπρου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα Ιούλιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ
ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ Κ
ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΒΑΘΜΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

του

Βασίλειου Μπίστα

Επιβλέπουσα:

Ευαγγελία Λάμπρου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

(Υπογραφή)

.....
Ευαγγελία Λάμπρου
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Γεώργιος Πανταζής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Ορθοδοξία Αραμπατζή
Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα Ιούλιος 2018

(Υπογραφή)

.....

ΜΠΙΣΤΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Μπίστας Βασίλειος, 2018

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ξεκινώντας θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους επιβλέποντες καθηγητές της παρούσας διπλωματικής εργασίας κυρία **Λάμπρου Ευαγγελία** και κύριο **Πανταζή Γεώργιο**, για την ανάθεση της εκπόνησης της αλλά για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια της αλλά και όλων των χρόνων φοίτησης μου στην σχολή ΑΤΜ. Τους ευχαριστώ πολύ επίσης, για τις γνώσεις που μου παρείχαν, τις εμπειρίες που μου μετέδωσαν και την καλή διάθεση που έδειξαν στην αντιμετώπιση δυσκολιών και λαθών που προέκυψαν στην πορεία. Ακόμη τους οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για την στήριξη τους σε μια δύσκολη καμπή της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Κατά την διάρκεια της φοίτησης μου στη σχολή διδάχθηκα την σημασία της συνύπαρξης και της συνεργασίας με άλλους ανθρώπους για την επίτευξη κοινών στόχων. Η παρούσα εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την βοήθεια των συναδέλφων μου αλλά και φίλων εκτός σχολής.

Ευχαριστώ πολύ τους συναδέλφους **Ανδρικόπουλου Ελένη**, **Βαθιώτη Γεώργιο**, **Καμπούρη Αναστάσιο** και **Κυριαζή Πελαγία** για την εθελοντική συμμετοχή τους στην εκτέλεση των πειραμάτων.

Ακόμη ένα μεγάλο ευχαριστώ στους επί 20 χρόνια φίλους μου **Μακρή Αθανάσιο** και **Μάνεση Γεώργιο** που ακόμη και αν η επιστήμη τους δεν σχετίζεται με το αντικείμενο της εργασίας μου, βοήθησαν με μεγάλη χαρά σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο **Φραγάκη Γιαννίκο** που μου έδωσε την ευκαιρία να κάνω τα πρώτα μου επαγγελματικά βήματα στον χώρο, χωρίς να μου στερεί χρόνο από την ενασχόληση με τις σπουδές και την διπλωματική μου εργασία.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για την αγάπη και την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στον 21^ο αιώνα, όπου παρουσιάζεται ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι απαιτήσεις ακρίβειας στις γεωδαιτικές εφαρμογές έχουν αυξηθεί κατακόρυφα. Πλέον, σφάλματα τα οποία παλαιότερα δεν ήταν γνωστά στους επιστήμονες, μπορούν να υπολογίζονται, να εφαρμόζεται η αντίστοιχη διόρθωση στις μετρήσεις αλλά και να εξαλείφονται από αυτές.

Για τον λόγο αυτό, κατασκευάζονται όργανα που παρέχουν μεγάλη ακρίβεια στην μέτρηση, ενώ ταυτόχρονα διαθέτουν πολλές ευκολίες και αυτοματισμούς. Παράλληλα, προτείνονται νέες μεθοδολογίες για την πραγματοποίηση μετρήσεων, ενώ ακόμη και πολύπλοκοι υπολογισμοί πραγματοποιούνται πολύ γρήγορα με την χρήση εξειδικευμένων ηλεκτρονικών εφαρμογών.

Έτσι λοιπόν ο σύγχρονος τοπογράφος μηχανικός είναι σε θέση να ανταποκριθεί σε εργασίες υψηλών απαιτήσεων ακρίβειας και αξιοπιστίας, χάρη στην τεχνογνωσία αλλά και τον σύγχρονο εξοπλισμό που κατέχει.

Μια τέτοια εργασία υψηλών απαιτήσεων σε ακρίβεια είναι και ο υπολογισμός των διορθώσεων λόγω διάθλασης και του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης k , με την μέθοδο της θερμοβαθμίδας, αντικείμενο το οποίο πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία.

Ο υπολογισμός της διόρθωσης λόγω διάθλασης και του συντελεστή k έχει απασχολήσει αρκετές φορές τους επιστήμονες στο παρελθόν. Η μέθοδος της θερμοβαθμίδας αποτελεί μια απαιτητική διαδικασία για την πραγματοποίηση αυτών των υπολογισμών.

Πρόκειται λοιπόν να προσδιοριστεί η θερμοβαθμίδα κατά την διάρκεια γεωμετρικής χωροστάθμησης, να αξιολογηθούν τα μοντέλα υπολογισμού της και μέσω αυτής της διαδικασίας να υπολογιστούν η διόρθωση λόγω διάθλασης και ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης για τις δεδομένες συνθήκες κατά την διάρκεια της διαδικασίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανατέθηκε τον Οκτώβριο του 2017 και ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 2018.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	III
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	IV
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	V
ΠΙΝΑΚΕΣ	VII
ΕΙΚΟΝΕΣ	XI
ΣΧΗΜΑΤΑ	XII
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	XIII
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	XIV
ABSTRACT	XVI
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ	
1.1 Γεωδαιτικές Μετρήσεις.....	2
1.2 Το φαινόμενο της διάθλασης	4
1.3 Ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k	7
1.4 Αντικείμενο της Εργασίας	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΘΕΡΜΟΒΑΘΜΙΔΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ k	
2.1 Η έννοια της θερμοβαθμίδας	11
2.2 Μοντέλα προσδιορισμού της Θερμοβαθμίδας	13
2.3 Διορθώσεις Λόγω Διάθλασης στη Γεωμετρική Χωροστάθμηση...	15
2.4 Ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k στη χωροστάθμηση	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ	
3.1 Γενικά.....	22
3.2 Σχεδιασμός.....	22
3.3 Εξοπλισμός	28

3.4 Οι αισθητήρες της θερμοκρασίας.....	30
3.5 Έλεγχοι και Προετοιμασία	32
3.6 Μετρήσεις.....	35
3.6.1 Μετρήσεις Εσωτερικού Χώρου.....	35
3.6.2 Μετρήσεις Εξωτερικού Χώρου	40
3.7 Επεξεργασία και αξιολόγηση δεδομένων.....	48
3.8 Επαναληπτική Σειρά Πειραμάτων.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΒΑΘΜΙΑΣ	
4.1 Μεθοδολογία.....	55
4.2 Προσαρμογή των μοντέλων.....	58
4.3 Προσαρμογή με αφαίρεση αισθητήρων	66
4.4 Σχολιασμός Προσαρμογών.....	73
4.5 Διόρθωση λόγω διάθλασης.....	75
4.6 Υπολογισμός συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης k	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
5.1 Συμπεράσματα	81
5.2 Προτάσεις	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85
ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2.1 Τα σημαντικότερα μοντέλα της Θερμοβαθμίδας.....	14
Πίνακας 2.2 Σχέση μεταξύ Θερμοβαθμίδας, Διόρθωσης λόγω διάθλασης και Δείκτη Γεωδαιτικής διάθλασης	20
Πίνακας 3.1 Format Δεδομένων Χωροβάτη.....	33
Πίνακας 3.2 Αρχείο καταγραφής χωροβάτη πρώτης εσωτερικής χωροστάθμησης	36
Πίνακας 3.3 Αρχείο καταγραφής αισθητήρων πρώτης εσωτερικής χωροστάθμησης	37
Πίνακας 3.4 Αρχείο καταγραφής χωροβάτη δεύτερης εσωτερικής χωροστάθμησης	38
Πίνακας 3.5 Δεδομένα αισθητήρων δεύτερης εσωτερικής χωροστάθμησης	39
Πίνακας 3.6 Δεδομένα Καταγραφής Αισθητήρα Χειρός	40
Πίνακας 3.7 Αρχείο καταγραφής χωροβάτη πρώτης εξωτερικής χωροστάθμησης	42
Πίνακας 3.8 Αρχείο καταγραφής αισθητήρων πρώτης εξωτερικής χωροστάθμησης	42
Πίνακας 3.9 Αρχείο καταγραφής χωροβάτη δεύτερης εσωτερικής χωροστάθμησης	44
Πίνακας 3.10 Αρχείο Καταγραφής Αισθητήρων δεύτερης εξωτερικής χωροστάθμησης	45
Πίνακας 3.11 Αρχείο Καταγραφής χωροβάτη τρίτης εξωτερικής χωροστάθμησης	46
Πίνακας 3.12 Αρχείο Καταγραφής αισθητήρων τρίτης εξωτερικής χωροστάθμησης	47
Πίνακας 3.13 Δεδομένα καταγραφής αισθητήρα χειρός.....	47
Πίνακας 3.14 Αρχείο καταγραφής χωροβάτη επαναληπτικής εσωτερικής χωροστάθμησης	50
Πίνακας 3.15 Αρχείο καταγραφής αισθητήρων επαναληπτικής εσωτερικής χωροστάθμησης	51

Πίνακας 3.16 Αρχείο καταγραφής χωροβάτης επαναληπτικής εξωτερικής χωροστάθμησης.....	52
Πίνακας 3.17 Αρχείο καταγραφής αισθητήρων επαναληπτικής εξωτερικής χωροστάθμησης.....	53
Πίνακας 3.18 Ενδείξεις ατμοσφαιρικής πίεσης κατά την διάρκεια των πειραμάτων	54
Πίνακας 4.1 Προσαρμογή μοντέλου Kukkamaki στην εσωτερική χωροστάθμηση.....	59
Πίνακας 4.2 Προσαρμογή μοντέλου Kukkamaki στην εξωτερική χωροστάθμηση.....	59
Πίνακας 4.3 Προσαρμογή μοντέλου Hegershoff στην εσωτερική χωροστάθμηση.....	60
Πίνακας 4.4 Προσαρμογή μοντέλου Hegershoff στην εξωτερική χωροστάθμηση.....	60
Πίνακας 4.5 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 1 στην εσωτερική χωροστάθμηση.....	61
Πίνακας 4.6 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 1 στην εξωτερική χωροστάθμηση.....	61
Πίνακας 4.7 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 2 στην εσωτερική χωροστάθμηση.....	62
Πίνακας 4.8 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 2 στην εξωτερική χωροστάθμηση.....	62
Πίνακας 4.9 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 3 στην εσωτερική χωροστάθμηση.....	63
Πίνακας 4.10 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 3 στην εξωτερική χωροστάθμηση.....	63
Πίνακας 4.11 Προσαρμογή μοντέλου Heer στην εσωτερική χωροστάθμηση.....	64
Πίνακας 4.12 Προσαρμογή μοντέλου Heer στην εξωτερική χωροστάθμηση.....	64
Πίνακας 4.13 Προσαρμογή μοντέλου Kharagani στην εσωτερική χωροστάθμηση.....	65

Πίνακας 4.14 Προσαρμογή μοντέλου Kharagani στην εξωτερική χωροστάθμηση.....	65
Πίνακας 4.15 Προσαρμογή μοντέλου Kukkamaki στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	67
Πίνακας 4.16 Προσαρμογή μοντέλου Kukkamaki στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	67
Πίνακας 4.17 Προσαρμογή μοντέλου Hugerhoff στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	68
Πίνακας 4.18 Προσαρμογή μοντέλου Hugerhoff στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	68
Πίνακας 4.19 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 1 στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	69
Πίνακας 4.20 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 1 στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	69
Πίνακας 4.21 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 2 στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	70
Πίνακας 4.22 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 2 στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	70
Πίνακας 4.23 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 3 στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	71
Πίνακας 4.24 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 3 στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	71
Πίνακας 4.25 Προσαρμογή μοντέλου Heer στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	72
Πίνακας 4.26 Προσαρμογή μοντέλου Heer στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων.....	72
Πίνακας 4.27 Πρώτη προσαρμογή μοντέλων στην εσωτερική χωροστάθμηση.....	74
Πίνακας 4.28 Πρώτη προσαρμογή μοντέλων στην εξωτερική χωροστάθμηση.....	74
Πίνακας 4.29 Δεύτερη προσαρμογή μοντέλων στην εσωτερική χωροστάθμηση.....	75

Πίνακας 4.30 Δεύτερη προσαρμογή μοντέλων στην εξωτερική χωροστάθμηση.....	75
Πίνακας 4.31 Διόρθωση τιμών λόγω καμπυλότητας	76
Πίνακας 4.32 Υπολογισμός της μεταβολής d του δείκτη διάθλασης n εσωτερικής χωροστάθμησης	77
Πίνακας 4.33 Διορθώσεις λόγω διάθλασης εσωτερικής χωροστάθμησης ..	78
Πίνακας 4.34 Συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης εσωτερικής χωροστάθμησης	79

EΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1: Τυπικό Total Station	4
Εικόνα 1.2: Ψηφιακός Χωροβάτης.....	4
Εικόνα 3.1: Reref Κτιρίου Λαμπαδαρίου	23
Εικόνα 3.2: Τούνελ Μετρολογικού Ελέγχου ΣΑΤΜ	24
Εικόνα 3.3: Διάδρομος Αιθουσών Λ, Κτίριο Λαμπαδάριο	25
Εικόνα 3.4: Εξωτερικός Χώρος κτιρίου Λαμπαδαρίου.....	27
Εικόνα 3.5: Χωροβάτης Leica DNA-03	29
Εικόνα 3.6: Σταδία από invar της Leica με βάση στήριξης	30
Εικόνα 3.7: Αισθητήρας Lord MicroStrain	31
Εικόνα 3.8: Αισθητήρας TinyTag Plus 2.....	32
Εικόνα 3.9: Τοποθέτηση αισθητήρων στην σταδία.....	35
Εικόνα 3.10: Πρώτη εσωτερική χωροστάθμηση.....	36
Εικόνα 3.11: Προσαρμογή των αισθητήρων στην τρίμετρη σταδία	40
Εικόνα 3.12: Πρώτη εξωτερική χωροστάθμηση	41
Εικόνα 4.1: Το εργαλείο Curve Fitting του Matlab.....	57
Εικόνα 4.2: Εισαγωγή δεδομένων στο Curve Fitting Tool	57
Εικόνα 4.3: Παράθυρο προσαρμογής στο Curve Fitting Tool	58
Εικόνα 4.4: Εισαγωγή Εξίσωσης για την προσαρμογή (Kukkamaki)	58
Εικόνα 4.5: Θέρμανση Εδάφους και Ατμόσφαιρας	66

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1.1 Η διάθλαση της ακτίνας	6
Σχήμα 1.2 Η διάθλαση της ακτίνας στα επιμέρους τμήματα της ατμόσφαιρας	7
Σχήμα 2.1 Η μεταβολή της θερμοκρασίας ανά ύψος	12
Σχήμα 2.2 Τα παράλληλα στο έδαφος ισοθερμικά στρώματα	16
Σχήμα 2.3 Η διαθλώμενη ακτίνα σε μέσα με διαφορετικό δείκτη διάθλασης.....	18
Σχήμα 2.4 Η πορεία της ακτίνας όταν η θερμοβαθμίδα είναι θετική.....	19
Σχήμα 2.5 Η πορεία της ακτίνας όταν η θερμοβαθμίδα είναι αρνητική ..	19
Σχήμα 3.1 Χωροστάθμηση με πλασματικές στάσεις	26
Σχήμα 3.2 Χωροστάθμηση «Τρίγωνο»	28
Σχήμα 3.3 Έλεγχος Μέσου-Άκρου.....	34
Σχήμα 3.4 Πρώτη Εξωτερική Χωροστάθμηση	41
Σχήμα 3.5 Δεύτερη Εξωτερική Χωροστάθμηση.....	44

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 3.1 Η θερμοβαθμίδα σε κάθε στάση της πρώτης εσωτερικής χωροστάθμησης	38
Διάγραμμα 3.2 Η Θερμοβαθμίδα σε κάθε στάση της δεύτερης εσωτερικής χωροστάθμησης	39
Διάγραμμα 3.3 Η Θερμοβαθμίδα κάθε σκόπευσης στην πρώτη εξωτερική χωροστάθμηση.....	43
Διάγραμμα 3.4 Η θερμοβαθμίδα της δευτερης εξωτερικής χωροστάθμησης (Σκοπεύσεις 1-9).....	45
Διάγραμμα 3.5 Η θερμοβαθμίδα της δευτερης εξωτερικής χωροστάθμησης (Σκοπεύσεις 10-18).....	46
Διάγραμμα 3.6 Η θερμοβαθμίδα στην τρίτη εξωτερική χωροστάθμηση.	47
Διάγραμμα 3.7 Η θερμοβαθμίδα της επαναληπτικής εσωτερικής χωροστάθμησης	51
Διάγραμμα 3.8 Η θερμοβαθμίδα της εξωτερικής επαναληπτικής χωροστάθμησης	53
Διάγραμμα 4.1 Μεταβολή Συντελεστή Γεωδαιτικής διάθλασης εσωτερικής χωροστάθμησης	79

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο την μελέτη και τον προσδιορισμό του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης k , με την μέθοδο της θερμοβαθμίδας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με την διεξαγωγή μιας σειράς χωροσταθμήσεων ακριβείας, κατά την διάρκεια των οποίων προσδιορίζεται η θερμοβαθμίδα με ειδικούς αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας.

Σκοπός της όλης διαδικασίας είναι η διόρθωση των αναγνώσεων της σταδίας των εκτελεσθέντων χωροσταθμήσεων λόγω διάθλασης και ο υπολογισμός του δείκτη γεωδαιτικής διάθλασης k .

Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο κεφάλαιο πραγματεύεται το φαινόμενο της διάθλασης και τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει τις γεωδαιτικές μετρήσεις. Αρχικά γίνεται αναφορά στα είδη των γεωδαιτικών μετρήσεων και τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό. Ύστερα, περιγράφεται το φαινόμενο της διάθλασης και η έννοια του δείκτη γεωδαιτικής διάθλασης k . Τέλος, προσδιορίζεται το ακριβές αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο έχει ως κύριο αντικείμενο την θερμοβαθμίδα. Αρχικά, αναφέρεται στην έννοια της θερμοβαθμίδας ενώ παρουσιάζονται τα προτεινόμενα μοντέλα προσδιορισμού της. Έπειτα, περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της διόρθωσης λόγω διάθλασης μέσω των προαναφερθέντων μοντέλων. Τέλος, περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού του δείκτη γεωδαιτικής διάθλασης k , με την χρήση της διόρθωσης λόγω διάθλασης.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Γίνεται εκτενής αναφορά στον σχεδιασμό της διαδικασίας αλλά και στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε. Περιγράφονται οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν, η απαραίτητη προετοιμασία που έγινε πριν την έναρξη των πειραμάτων και παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα δεδομένα που προέκυψαν από αυτή. Έπειτα πραγματοποιείται η αξιολόγηση των πρωταρχικών δεδομένων. Τέλος παρουσιάζονται τα δεδομένα που προέκυψαν από μια επαναληπτική

πειραματική διαδικασία, η οποία κρίθηκε αναγκαία μετά την πρώτη αξιολόγηση των δεδομένων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο προσδιορίζεται η θερμοβαθμίδα από τα δεδομένα καταγραφής των αισθητήρων κατά την διάρκεια των πειραμάτων και γίνεται αξιολόγηση δύο διαφορετικών προσαρμογών των υπαρχόντων μοντέλων. Τέλος υπολογίζεται η διόρθωση λόγω διάθλασης και ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k , μετά την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από το σύνολο της παρούσας εργασίας. Ακόμη παρουσιάζεται μια σειρά προτάσεων για βελτίωση της μεθόδου για μελλοντική έρευνα πάνω στο αντικείμενο αυτό.

Determination of geodetic refraction coefficient k by using the temperature gradient method

ABSTRACT

This diploma thesis concerns the study and evaluation of existing temperature gradient models. This will be achieved by conducting a series of precise levelling processes, during which, the vertical temperature gradient will be determined through measuring the air temperature with sensors.

The aim of the whole process is to correct the staff readings of the levellings due to refraction and to calculate the geodetic refraction coefficient.

More specifically, the first chapter discusses the phenomenon of refraction and the way it affects geodetic measurements. Firstly, the types of geodetic measurements and most widely used equipment are presented. The physics of refraction and the geodetic refraction coefficient k concept will be covered next. The exact object of this diploma thesis will be described in detail at the end of this chapter.

The second chapter concerns the temperature gradient concept and the suggested models for determining it. Moreover, it is explained how the correction value due to refraction is being calculated through those models. Finally, the method of determining the geodetic refraction coefficient k is described, by using the previously calculated corrections.

The third chapter showcases the experimental procedure that took place during this diploma thesis. The design of the entire process is described in detail, as well as the equipment that was used. Moreover, it analyses the full extent of preparations and checks that took place before the process began. After the entire procedure is explained, the collected data is presented and evaluated in detail. Finally, it presents the data that was collected by a series of new experiments which was deemed necessary after the evaluation of the first collected data.

In the fourth chapter, the temperature gradient is determined by the sensor-collected temperature data and two different fittings of existing models are

evaluated. Finally, by choosing the model that fits best from the evaluations, the correction due to refraction and the geodetic refraction coefficient k are calculated.

In the final chapter, the conclusions of this whole study and the observations during the experimental procedure are presented. Also, suggestions are made for improvement of this method to be used in future research.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τα μεγέθη που μετρούνται στην γεωδαισία, δεν είναι γνωστές οι αληθείς τιμές τους και δεν υπάρχει τρόπος προσδιορισμού τους. Το ίδιο ισχύει και για τα μεγέθη που υπολογίζονται εμμέσως από τις μετρήσεις αυτές. Αυτό συμβαίνει γιατί σε κάθε μέτρηση υπεισέρχεται μια σειρά σφαλμάτων. Κάποια από αυτά τα σφάλματα είναι άγνωστα και κάποια άλλα μπορούν να προσδιοριστούν, να διορθωθούν ή και να εξαλειφθούν. Για τον λόγο αυτό, αφού δεν μπορεί να προσδιοριστεί η αληθής τιμή ενός μεγέθους, γίνεται προσπάθεια να την προσεγγιστεί όσο πιο ικανοποιητικά γίνεται, ανάλογα πάντα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εργασίας.

Μια από τις σημαντικότερες πηγές σφαλμάτων στις γεωδαιτικές μετρήσεις είναι η διάθλαση του φωτός. Επηρεάζει την μέτρηση των μηκών, των γωνιών αλλά και των υψομετρικών διαφορών. Έτσι λοιπόν, έχουν ανακαλυφθεί διάφορες μέθοδοι για την εξάλειψη του σφάλματος αυτού.

Σε εξειδικευμένες εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων σε ακρίβεια, είναι απαραίτητη η διόρθωση των μετρήσεων λόγω διάθλασης. Μια από τις μεθόδους που υπολογίζουν την διόρθωση λόγω διάθλασης στις αναγνώσεις της σταδίας κατά την γεωμετρική χωροστάθμηση είναι η μέθοδος της θερμοβαθμίδας.

Κατά την μέθοδο αυτή, προσδιορίζεται η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα κατά την διάρκεια της χωροστάθμησης, με την μέτρηση της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένα ύψη από το έδαφος. Μέσω μιας σειράς υπολογισμών, προσδιορίζεται η διόρθωση λόγω διάθλασης και ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k για κάθε σκόπευση της χωροστάθμησης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται και αξιολογείται η μέθοδος αυτή και μέσω μιας σειράς χωροσταθμίσεων ακριβείας γίνεται προσπάθεια για διόρθωση των αναγνώσεων της σταδίας και υπολογισμός του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης k .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

1.1 Γεωδαιτικές Μετρήσεις

Η λέξη γεωδαισία προέρχεται από το ουσιαστικό Γη και το αρχαίο ρήμα δαίομαι. Ετυμολογικά σημαίνει μοιράζω την Γη. Πρόκειται για μια από τις αρχαιότερες επιστήμες και συνεχίζει μέχρι και σήμερα να είναι απαραίτητη σε πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες.

Αντικείμενο της γεωδαισίας αποτελεί ο ακριβής προσδιορισμός του σχήματος και του μεγέθους της φυσικής γήινης επιφάνειας, του πεδίου βαρύτητας της Γης καθώς και ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται στον χώρο και τον χρόνο [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., 2010].

Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας, η επιστήμη της γεωδαισίας προοδεύει και τα αντικείμενα της διευρύνονται και εξειδικεύονται συνεχώς. Έτσι λοιπόν, με βάση το αντικείμενο μελέτης, η γεωδαισία χωρίζεται στους εξής επιμέρους κλάδους:

- Βιομηχανική Γεωδαισία, αντικείμενο της οποίας είναι ο έλεγχος της ορθής κατασκευής προϊόντων και η παρακολούθηση βιομηχανικών εγκαταστάσεων και μηχανημάτων
- Γεωδαιτική Μετρολογία η οποία ασχολείται με τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας γεωδαιτικών οργάνων
- Φυσική Γεωδαισία, η οποία ασχολείται με τον προσδιορισμό του γήινου πεδίου βαρύτητας
- Γεωδαιτική Αστρονομία, με αντικείμενο τον προσδιορισμό θέσεων σημείων και διευθύνσεων με χρήση αστρονομικών παρατηρήσεων
- Διαστημική Γεωδαισία, αντικείμενο της οποίας είναι μετρήσεις από την Γη προς άλλους πλανήτες ή δορυφόρους
- Η δορυφορική γεωδαισία, η οποία έχει ως αντικείμενο την χρήση του Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς σε γεωδαιτικές εφαρμογές

- Ανώτερη Γεωδαισία, που ασχολείται με μετρήσεις σε μεγάλα τμήματα της γης και χρησιμοποιεί ως επιφάνεια αναφοράς το ελλειψοειδές
- Η Τοπογραφία (ή Εφαρμοσμένη Γεωδαισία), η οποία περιλαμβάνει μετρήσεις και υπολογισμούς σε μικρά κομμάτια της φυσικής γήινης επιφάνειας και χρησιμοποιεί ως επιφάνεια αναφοράς το οριζόντιο επίπεδο. Η τοπογραφία παίζει σημαντικό ρόλο κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή αλλά και την παρακολούθηση τεχνικών έργων. Οι βασικές πρακτικές εργασίες που εκτελούνται είναι οι εξής:
- Η απεικόνιση τμημάτων της φυσικής γήινης επιφάνειας ή τεχνικών έργων σε διαγράμματα με γνωστές συντεταγμένες σε συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς (Αποτύπωση)
- Η υλοποίηση στο έδαφος ενός Τεχνικού Έργου, από δοσμένο σχέδιο ή μελέτη (Χάραξη) και η
- Παρακολούθηση κίνησης σημείων που βρίσκονται στο έδαφος ή σε κάποιο Τεχνικό Έργο. [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., 2010].

Οι εργασίες αυτές περιλαμβάνουν μετρήσεις πεδίου καθώς και τους απαραίτητους υπολογισμούς. Με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού λοιπόν, μετρούνται οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες, μήκη, υψομετρικές διαφορές, το μέτρο και η διεύθυνση του διανύσματος της βαρύτητας.

Για την μέτρηση γωνιών χρησιμοποιούνται κυρίως ψηφιακά θεοδόλιχα. Τα μήκη σε μικρές αποστάσεις ή σε εφαρμογές με μικρές απαιτήσεις σε ακρίβεια μπορούν να μετρηθούν με απλές μετροταινίες. Για μεγαλύτερη ευκολία και καλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιούνται όργανα μέτρησης μήκους με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (EDM). Πλέον τα θεοδόλιχα και τα EDM έχουν ενσωματωθεί σε ένα όργανο που ονομάζεται ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός (Total Station) (εικόνα 1.1). Οι υψομετρικές διαφορές μετρούνται κυρίως με οπτικούς ή ψηφιακούς χωροβάτες (εικόνα 1.2). Χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους, υψομετρικές διαφορές μπορούν να μετρηθούν και με την χρήση Total Station. Τα όργανα που μετρούν το μέτρο του διανύσματος της βαρύτητας ονομάζονται βαρυτήμετρα. Τέλος, σε πολλές εφαρμογές της γεωδαισίας απαραίτητη είναι και η μέτρηση του χρόνου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται χρονόμετρα ακριβείας.



Εικόνα 1.1 Τυπικό Total Station



Εικόνα 1.2 Ψηφιακός Χωροβάτης

1.2 Το φαινόμενο της διάθλασης

Μελετώντας τις πηγές σφαλμάτων στις γεωδαιτικές μετρήσεις παρατηρείται ότι το φαινόμενο της διάθλασης επηρεάζει άλλοτε περισσότερο και άλλοτε λιγότερο όλα τα είδη των μετρήσεων.

Κατά την μέτρηση των μηκών με όργανα που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η ακτίνα που εκπέμπεται διαθλάται, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ταχύτητα διάδοσης της και να προκαλείται συστηματικό σφάλμα στην μέτρηση. Κατά την μέτρηση των γωνιών (κυρίως των ζενίθιων) με θεοδόλιχα, η διάθλαση προκαλεί παραμόρφωση της οπτικής ακτίνας με αποτέλεσμα να υπεισέρχεται συστηματικό σφάλμα στην μέτρηση. Τέλος, κατά την μέτρηση υψομετρικών διαφορών με το σύστημα χωροβάτη-σταδία η οπτική ακτίνα επίσης παραμορφώνεται με αποτέλεσμα ο στόχος να φαίνεται είτε ψηλότερα είτε χαμηλότερα από ότι πραγματικά είναι.

Η διάθλαση είναι το φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο μια ακτίνα εκτρέπεται της πορείας της όταν περνά υπό γωνία από ένα μέσο σε ένα άλλο, του οποίου η ταχύτητα διάδοσης είναι διαφορετική. Όταν λοιπόν η ακτίνα πέφτει υπό γωνία φ στην επιφάνεια διεπαφής των δυο μέσων, εκτρέπεται και συνεχίζει με γωνία φ' στο δεύτερο μέσο. Αν πέσει κάθετα στην επιφάνεια διεπαφής, συνεχίζει χωρίς να αλλάξει πορεία [Zuccher S., 2013].

Δείκτης διάθλασης χαρακτηρίζεται το μέτρο της εκτροπής (ή κάμψης) που υφίσταται μια ακτίνα διερχόμενη από ένα διαπερατό μέσον σε άλλο. Ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας διάδοσης του φωτός "κενό" προς την ταχύτητα διάδοσης στο υπό εξέταση διαπερατό μέσο [<https://el.wikipedia.org/wiki/Διάθλαση>].

Ο δείκτης αυτός σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα διάδοσης της ακτίνας στο μέσο. Όταν το μέσο διάδοσης είναι το κενό, δηλαδή η ακτίνα μεταδίδεται με την ταχύτητα του φωτός, δεν υπάρχει διάθλαση, δηλαδή ο δείκτης n είναι ίσος με 1. Σε οποιοδήποτε άλλο μέσο με διαφορετική ταχύτητα διάδοσης, ο δείκτης είναι μεγαλύτερος από 1. Η μαθηματική σχέση που δίνει τον δείκτη διάθλασης είναι:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

Όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και v είναι η ταχύτητα του φωτός του μέσου στο οποίο διαδίδεται.

Οι δύο βασικές αρχές της διάθλασης είναι οι εξής:

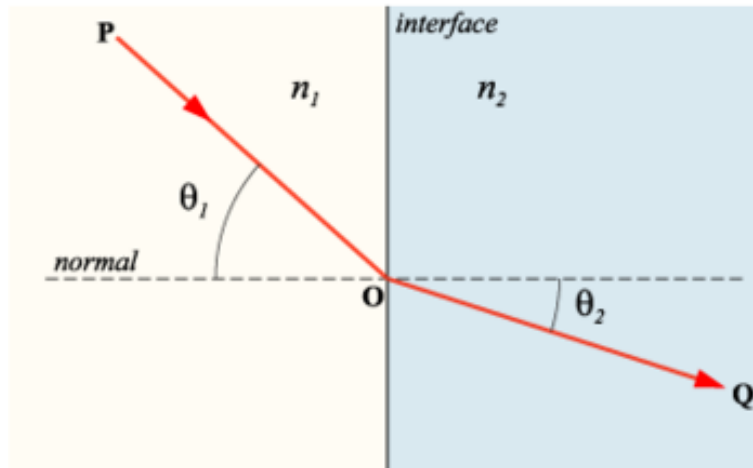
- Η προσπίπτουσα και η διαθλώμενη ακτίνα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο
- Ο λόγος των ημιτόνων των γωνιών που σχηματίζει η προσπίπτουσα και η διαθλώμενη ακτίνα είναι αντιστρόφως ανάλογος του λόγου των συντελεστών διάθλασης των δυο μέσων (Νόμος του Snell), (Σχήμα 1.1).

Η μαθηματική έκφραση του νόμου του Snell, όταν η ακτίνα διέρχεται από ένα μέσο με δείκτη διάθλασης n_1 σε ένα άλλο με διαφορετικό δείκτη διάθλασης n_2 , όταν η γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια διεπαφής είναι θ_1 είναι:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2)$$

Όταν οι γωνίες είναι πολύ μικρές γίνεται η παραδοχή ότι τα ημίτονα των γωνιών είναι περίπου ίσα με τις ίδιες τις γωνίες:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \approx \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.1 Η διάθλαση της ακτίνας
 [<https://el.wikipedia.org/wiki/Διάθλαση>]

Η διάθλαση μέσα στην ατμόσφαιρα συνήθως θεωρείται μηδαμινή. Στην πραγματικότητα υπάρχει, αλλά είναι πάρα πολύ μικρή. Μια τυπική τιμή του δείκτη διάθλασης της είναι $n=1.00035$. Όμως ο δείκτης αυτός δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται σε διαφορετικά σημεία της ατμόσφαιρας της Γης. Για την καλύτερη μελέτη των μεταβολών του δείκτη διάθλασης μέσα στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιείται ο όρος διαθλασιμότητα N , όπου:

$$N = 10^6(n - 1) \quad (1.4)$$

όπου n ο δείκτης διάθλασης της συγκεκριμένης περιοχής [Hum V.S., 2017].

Η διαθλασιμότητα της ατμόσφαιρας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η πίεση καθώς και το υψόμετρο. Μια τυπική σχέση που συνδέει την διαθλασιμότητα με τους παράγοντες αυτούς είναι:

$$N = \frac{77.6}{T} * \left(p + \frac{4810e}{T} \right) \quad (1.5)$$

όπου T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

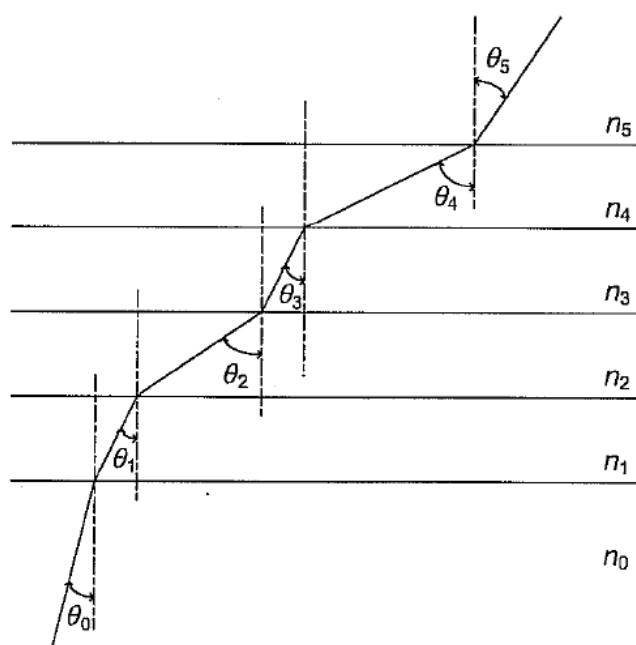
p η πίεση σε mbar

e μερική πίεση των υδρατμών σε mbar [Hum V.S., 2017].

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται πως η διαθλασιμότητα είναι ανάλογη της πίεσης και της υγρασίας και αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας.

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι όσο ανεβαίνει το υψόμετρο, η διαθλασιμότητα μειώνεται.

Αν λοιπόν θεωρηθεί ότι η ατμόσφαιρα αποτελείται από επιμέρους στρώματα με διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας όσο μεταβάλλεται το υψόμετρο, άρα και με διαφορετικό συντελεστή διάθλασης, τότε μια ακτίνα που κινείται μέσα στην ατμόσφαιρα υπόκεινται σε συνεχείς εκτροπές της πορείας της και στην ουσία μετατρέπεται σε μια καμπύλη (Σχήμα 1.2). Φυσικά πρόκειται για πολύ μικρές μεταβολές, οι οποίες σε μικρές αποστάσεις είναι ίσως αμελητέες. Η καμπύλωση αυτή της οπτικής ακτίνας προκαλεί σφάλματα κατά την ανάγνωση γωνιών και την ένδειξη σταδίων κατά τη χρήση οπτικών οργάνων.



Σχήμα 1.2 Η διάθλαση της ακτίνας στα επιμέρους τμήματα της ατμόσφαιρας

1.3 Ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k

Ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k ορίζεται ως ο λόγος της ακτίνας της καμπύλης της οπτικής ακτίνας προς την ακτίνα της Γης (Torge, 2001).

$$k = \frac{r}{R} \quad (1.6)$$

Είναι ένας καθαρός αριθμός ο οποίος δείχνει πόσο έντονο είναι το φαινόμενο της διάθλασης μιας οπτικής ακτίνας που κινείται κατά μήκος της ατμόσφαιρας. Χαρακτηρίζει στην ουσία την καμπυλότητα που αποκτά η οπτική ακτίνα όταν αυτή διέρχεται από τα στρώματα της ατμόσφαιρας [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., 2010]. Εξαρτάται κυρίως από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία η πίεση και η υγρασία της περιοχής.

Ο συντελεστής k είναι απαραίτητος κατά τη διόρθωση λόγω της ατμοσφαιρικής διάθλασης στις αναγνώσεις σταδίας σε εφαρμογές γεωμετρικής χωροστάθμησης αλλά και σε μετρήσεις ζενίθιων γωνιών Z .

Παρόλα αυτά η διόρθωση αυτή δεν είναι ποτέ ακριβής καθώς ο συντελεστής k μεταβάλλεται κάθε χρονική στιγμή.

Επίσης, είναι πολύ δύσκολο ο συντελεστής αυτός να υπολογίζεται κάθε φορά κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Για τον λόγο αυτό στις διορθώσεις χρησιμοποιείται κάποια προσεγγιστική τιμή του.

Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται η τιμή 0.16, η οποία έχει προκύψει ως μέση τιμή από διάφορες έρευνες στο παρελθόν. Η τιμή αυτή φυσικά πολλές φορές απέχει πάρα πολύ από την πραγματική τιμή του k την στιγμή που γίνονται οι μετρήσεις.

Για τον λόγο αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται μέθοδοι που εξαλείφουν το σφάλμα λόγω διάθλασης, ώστε να μην χρειαστεί να υπολογιστεί.

Ο συντελεστής k όπως αναφέρθηκε δεν είναι ένα άμεσα μετρούμενο μέγεθος, αλλά προκύπτει από μετρήσεις γωνιών και μετεωρολογικών συνθηκών. Οι μέθοδοι υπολογισμού του είναι οι εξής:

- Η μέθοδος των αμοιβαίων σκοπεύσεων, κατά την οποία πραγματοποιούνται αμοιβαίες και ταυτόχρονες μετρήσεις ζενίθιων γωνιών μεταξύ δυο σημείων.
- Η μέθοδος των απλών σκοπεύσεων, κατά την οποία επιλύεται η σχέση της τριγωνομετρικής υψομετρίας ως προς k . Κατά την μέθοδο αυτή όλα τα μεγέθη που υπάρχουν στην εξίσωση θα πρέπει να έχουν

μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια ώστε να προσεγγιστεί όσο δυνατόν καλύτερα ο k .

- Η μέθοδος της θερμοβαθμίδας, κατά την οποία υπολογίζεται η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα ενώ παράλληλα μετρούνται η θερμοκρασία η πίεση και η υγρασία. [Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., 2010]

1.4 Αντικείμενο της Εργασίας

Μια οπτική ακτίνα που ταξιδεύει στην ατμόσφαιρα εκτρέπεται λόγω διάθλασης. Ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας που επικρατούν στην περιοχή το φαινόμενο μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο έντονο. Σε εργασίες που απαιτούν υψηλή ακρίβεια μετρήσεων, η διάθλαση εισάγει σφάλμα που δεν θα πρέπει να θεωρείται αμελητέο. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμη η διόρθωση των μετρήσεων λόγω διάθλασης. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει κατά κύριο λόγο μετρήσεις υψομετρικών διαφορών κατά την γεωμετρική χωροστάθμηση.

Το σφάλμα που προκύπτει λόγω διάθλασης μπορεί να υπολογιστεί με τον προσδιορισμό της θερμοβαθμίδας την στιγμή που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις.

Κατά καιρούς στο παρελθόν έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα υπολογισμού της θερμοβαθμίδας.

Κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη, η αξιολόγηση και η επιλογή του βέλτιστου από τα υπάρχοντα μοντέλα υπολογισμού της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας.

Ο υπολογισμός της θερμοβαθμίδας είναι μια σημαντική διαδικασία η οποία με κατάλληλους υπολογισμούς δίνει τις διορθώσεις λόγω διάθλασης στην ανάγνωση της σταδίας κατά την γεωμετρική χωροστάθμηση. Η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα υπολογίζεται με ταυτόχρονες μετρήσεις της θερμοκρασίας σε διάφορα ύψη από το έδαφος κατά την διεύθυνση της κατακόρυφου.

Για τον σκοπό αυτό στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις γεωμετρικής χωροστάθμησης ακριβείας, κατά την διάρκεια της οποίας θα

μετράται η θερμοκρασία κατά μήκος της σταδίας σε διάφορες θέσεις, ταυτόχρονα, την στιγμή κάθε σκόπευσης, για τον προσδιορισμό της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας σε κάθε σκόπευση του χωροβάτη.

Τα δεδομένα των μετρήσεων της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας με κάθε ένα από τα υπάρχοντα μοντέλα. Η προσαρμογή των μοντέλων στα δεδομένα θερμοκρασίας γίνεται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ακόμη πραγματοποιείται στατιστικός έλεγχος των αποτελεσμάτων της προσαρμογής ώστε να επιλεγεί το βέλτιστο μοντέλο. Έτσι προκύπτουν με κατάλληλους υπολογισμούς οι διορθώσεις σε κάθε ανάγνωση της σταδίας κατά τις γεωμετρικές χωροσταθμίσεις.

Τέλος από τις διορθώσεις αυτές θα υπολογίζεται ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΡΜΟΒΑΘΜΙΔΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ Κ

2.1 Η έννοια της θερμοβαθμίδας

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας από τα κατώτερα της στρώματα (τροπόσφαιρα) που πραγματοποιούνται οι ανθρώπινες δραστηριότητες μειώνεται όσο ταξιδεύει κανείς από την επιφάνεια της γης κατακόρυφα προς τα πάνω.

Στα πρώτα δέκα χιλιόμετρα της ατμόσφαιρας το φαινόμενο παρατηρείται έντονα, ενώ όσο ανεβαίνει κανείς ψηλότερα μειώνεται δραματικά. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ακτίνες του ηλίου θερμαίνουν αρχικά την επιφάνεια της Γης και εκείνη με την σειρά της θερμαίνει τα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα.

Η μέση μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος ονομάζεται θερμοβαθμίδα (ή κατακόρυφη θερμοβαθμίδα) και είναι περίπου 6.5°C ανά 1000m [Κατσαφάδος, Μαυροματίδης, 2010] (Σχήμα 2.1).

Η θερμοβαθμίδα συνήθως συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα γ και ισχύει ότι:

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.1)$$

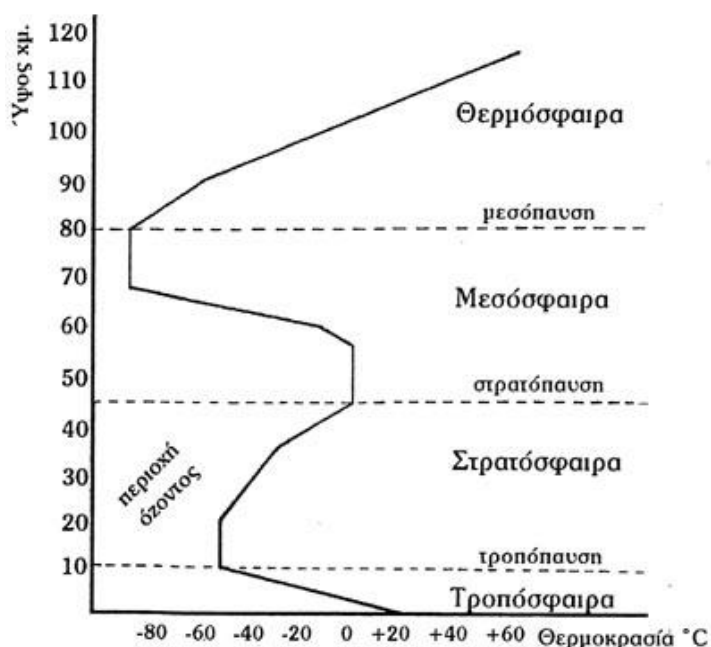
Όπου: T η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$ και
 z το υψόμετρο από την επιφάνεια της γης σε m

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει πως με την αύξηση του ύψους, η θερμοκρασία μειώνεται με ρυθμό γ .

Επειδή η σχετική υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα επηρεάζεται πάρα πολύ από την θερμοκρασία και τις μεταβολές της καθώς και αντιστρόφως, έχουν εισαχθεί οι έννοιες της ξηρής και υγρής αδιαβατικής θερμοβαθμίδας.

Στην περίπτωση στην οποία θεωρείται μια αέρια μάζα ανερχόμενη στην ατμόσφαιρα δεν περιέχει υδρατμούς και δεν ανταλλάσσει θερμότητα με τον περιβάλλοντα χώρο (αδιαβατική), η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα είναι περίπου $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ και ονομάζεται Ξηρή Αδιαβατική Κατακόρυφη Θερμοβαθμίδα [Λαζαρίδης Μ, 2010].

Στην αντίθετη περίπτωση στην οποία μια αέρια μάζα είναι κορεσμένη από υδρατμούς και ψύχεται αδιαβατικά καθώς ανέρχεται στην ατμόσφαιρα, ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας είναι μικρότερος και είναι της τάξεως των $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ και ονομάζεται Υγρή Αδιαβατική Κατακόρυφη Θερμοβαθμίδα [Λαζαρίδης Μ, 2010].



Σχήμα 2.1 Η μεταβολή της θερμοκρασίας ανά ύψος [Πύλη Παιδαγωγικού Υλικού Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης]

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ανεβαίνοντας υψόμετρο, η θερμοκρασία μειώνεται.

Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν περιπτώσεις που αυτό το φαινόμενο γίνεται αντίστροφα, πρόκειται δηλαδή για το φαινόμενο της θερμοκρασιακής αναστροφής. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει την νύχτα όπου το θερμότερο έδαφος εκπέμπει προς το ψυχρότερο περιβάλλον μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία με συνέπεια να ψύχεται. Έτσι λοιπόν τα χαμηλότερα στρώματα αέρα που ξεκινούν από το έδαφος και φτάνουν ως τα 100-200

μέτρα είναι ψυχρότερα από τα υπερκείμενά τους. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και κατά την διάρκεια της ημέρας όταν ένα στρώμα αέρα περνά πάνω από παγωμένη επιφάνεια εδάφους. Το φαινόμενο της θερμοκρασιακής αναστροφής παρατηρείται ακόμη και κατά την κάθοδο ψυχρών μαζών αέρα σε χαμηλότερα ύψη ή αντιστρόφως όταν θερμότερα στρώματα αέρα ανεβαίνουν σε μεγαλύτερα ύψη.

Όταν παρατηρείται ομαλή μεταβολή της θερμοβαθμίδας και δεν υπάρχει θερμοκρασιακή αναστροφή για κανέναν από τους προαναφερθέντες λόγους, τότε υπάρχει ευστάθεια στην ατμόσφαιρα, αντιθέτως υπάρχει αστάθεια.

2.2 Μοντέλα προσδιορισμού της Θερμοβαθμίδας

Είναι γεγονός πως στις αναγνώσεις του χωροβάτη κατά την χωροστάθμηση παρουσιάζονταν κάποιο συστηματικό σφάλμα το οποίο ήταν άγνωστο στους ερευνητές για αρκετά χρόνια πριν ανακαλυφθεί πως οφειλόταν στην διάθλαση και προταθούν τα πρώτα μοντέλα υπολογισμού της θερμοβαθμίδας. Οι πρώτες προσπάθειες για τον υπολογισμό των διορθώσεων λόγω διάθλασης εντοπίζονται πίσω στον 19^ο αιώνα και συγκεκριμένα το 1896, όπου ο C. Lallemand πρότεινε το πρώτο μοντέλο υπολογισμού της θερμοβαθμίδας. Πρόκειται για μια σχέση που συνδέει την θερμοκρασία με την απόσταση από το έδαφος με λογαριθμικό τρόπο. Συγκεκριμένα:

$$t = a + b * \log(z + c) \quad (2.2)$$

όπου t η θερμοκρασία,

z η απόσταση από το έδαφος

a, b, c οι παράμετροι του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού δεν φάνηκε να εφαρμόζονται στην πράξη με αποτέλεσμα να μην θεωρείται αξιόπιστο.

Ο πρώτος που συνδύασε τις θεωρητικές του γνώσεις με την πρακτική εφαρμογή ήταν ο Kukkamaki, σε μια εποχή όπου η ακρίβεια της χωροστάθμησης είχε αυξηθεί πολύ και το σφάλμα λόγω διάθλασης δεν μπορούσε να θεωρηθεί αμελητέο.

Το μοντέλο που πρότεινε ο Kukkamaki το 1938 είναι μια εκθετική συνάρτηση της μορφής:

$$t = a + b * z^c \quad (2.3)$$

Πολλοί ερευνητές μετά τον Kukkamaki μελέτησαν τον τρόπο υπολογισμού της θερμοβαθμίδας και μέσω διαφόρων πειραματικών διαδικασιών κατέληξαν σε διαφορετικά μοντέλα προσδιορισμού της θερμοβαθμίδας. Τα σημαντικότερα μοντέλα που προτάθηκαν ως σήμερα παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 2.1:

Hugershoff (1907):	$t = a + b * z^2$
Kukkamaki (1938):	$t = a + b * z^c$
Reissmann 1 (1954):	$t = a + b * z + c * z^2$
Reissmann 2 (1954):	$t = a + b * z + c * z^2 + f * z^3$
Reissmann 3 (1954):	$t = a + b * z + c * z^2 + f * z^3 + g * z^4$
Heer (1984):	$t = a + b * \exp(c * z)$
Kharagani (1987):	$t = a * z + b * z^c$

Πίνακας 2.1 Τα σημαντικότερα μοντέλα της Θερμοβαθμίδας (Kalman Horvath, 1995)

Οι ερευνητές λοιπόν, μπορούν πραγματοποιώντας μετρήσεις της θερμοκρασίας (t) σε συγκεκριμένα ύψη από το έδαφος (z), να υπολογίσουν μέσω της μεθόδου των Ελαχίστων Τετραγώνων τις καλύτερες τιμές των συντελεστών του εκάστοτε μοντέλου μελέτης.

Γνωρίζοντας τους συντελεστές αυτούς, είναι δυνατός ο υπολογισμός της διόρθωσης στην ανάγνωση της σταδίας λόγω διάθλασης, κατά την εκτέλεση μιας γεωμετρικής χωροστάθμησης.

2.3 Διορθώσεις Λόγω Διάθλασης στη Γεωμετρική Χωροστάθμηση

Η βασική εξίσωση υπολογισμού της διόρθωσης c_R λόγω διάθλασης στην ανάγνωση της σταδίας από το όργανο είναι η εξής:

$$c_R = \frac{d * S^2}{(Z - Z_I)^2} * \int_{Z_I}^Z \Delta t * dz \quad (2.4)$$

όπου:

d : η μεταβολή του δείκτη διάθλασης n , όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά 1°C :

$$d = -10^{-6}(0.933 - 0.0064(T - 20)) \cdot P/1013$$

P : Η ατμοσφαιρική πίεση (mbar)

Z_I : Το ύψος οργάνου (m)

Z : Η ανάγνωση της σταδίας από το όργανο (m)

S : Η οριζόντια απόσταση μεταξύ του οργάνου και της σταδίας (m)

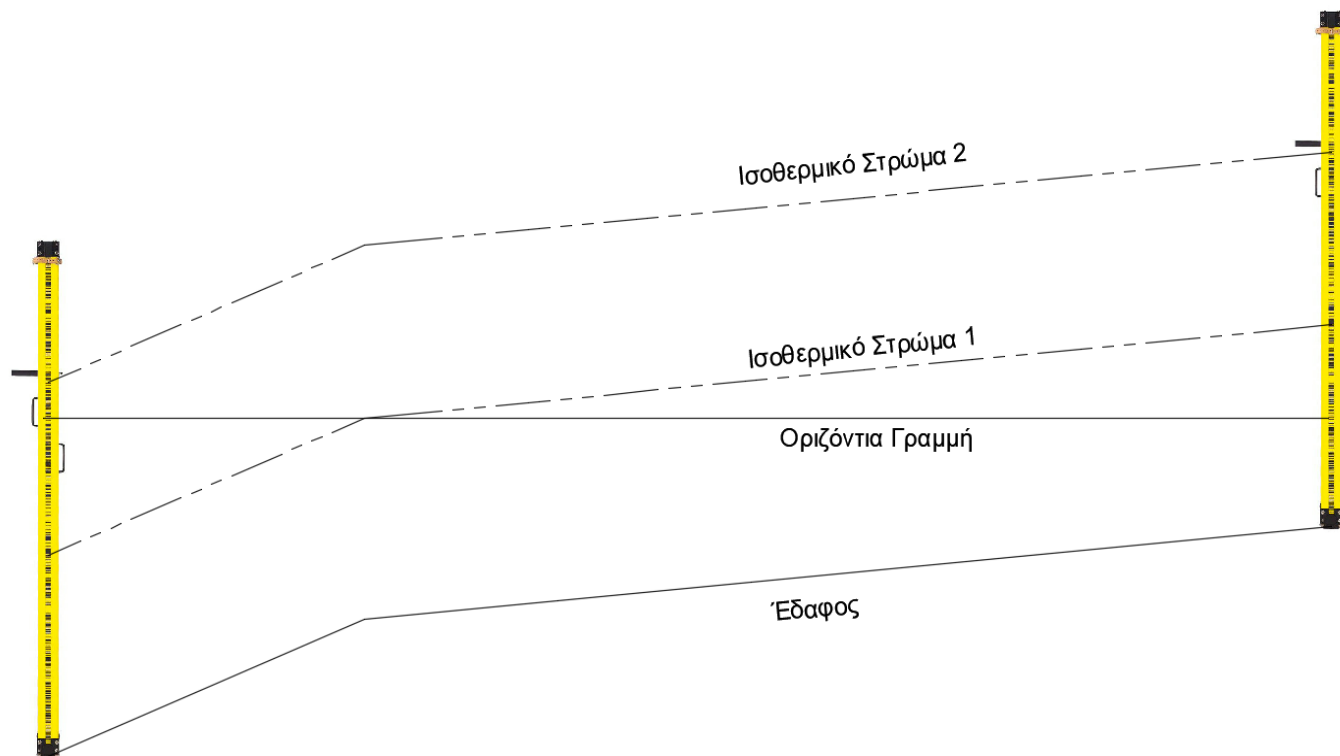
Δt : Η μεταβολή της θερμοκρασίας, όπως αυτή εκφράζεται από το εκάστοτε μοντέλο μελέτης

Ο τύπος αυτός με τον οποίο υπολογίζεται η διόρθωση, χρησιμοποιείται μετά από δυο παραδοχές.

Θεωρείται ότι τα ισοθερμικά στρώματα του αέρα είναι παράλληλα στο έδαφος, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 2.2. Αυτό στην πραγματικότητα δεν ισχύει πλήρως καθώς τα ισοθερμικά στρώματα συνήθως παρουσιάζουν μια καμπύλη μορφή και δεν είναι πάντα παράλληλα στο έδαφος.

Γίνεται επίσης η παραδοχή πως ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k , παραμένει σταθερός ανάμεσα στη σταδία και το όργανο. Παρόλα αυτά η μεταβολή του ανάμεσα στο όργανο και την σταδία μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Σημειώνεται πως η ίδια σχέση χρησιμοποιείται και για την όπισθεν και για την έμπροσθεν ανάγνωση της σταδίας κατά την γεωμετρική χωροστάθμηση.



Σχήμα 2.2 Τα παράλληλα στο έδαφος ισοθερμικά στρώματα

Η διόρθωση λόγω διάθλασης στην ανάγνωση της σταδίας από τον χωροβάτη προκύπτει από την σχέση 2.4, τοποθετώντας στον όρο Δt την σχέση του αντίστοιχου μοντέλου που πρόκειται να μελετηθεί και υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα από Z ως Z_i :

Kukkamaki:

$$c_R = -\frac{d \cdot S^2 \cdot b}{(Z - Z_i)^2} \cdot \left[\frac{1}{c+1} \cdot Z^{c+1} - Z_i^c \cdot Z + \frac{c}{c+1} \cdot Z_i^{c+1} \right] \quad (2.5)$$

Hugershoff:

$$c_R = -\frac{d \cdot S^2 \cdot b}{(Z - Z_i)^2} \cdot \left(\frac{Z^3}{3} - Z_i^2 Z + \frac{2Z_i^3}{3} \right) \quad (2.6)$$

Reissmann 1:

$$c_R = -\frac{1}{6} \cdot d \cdot S \cdot [3b + 2c \cdot (Z + 2 \cdot Z_i)] \quad (2.7)$$

Reissmann 2:

$$c_R = -\frac{1}{12} \cdot d \cdot S^2 \cdot (6b + 4c \cdot (Z + 2Z_i) + 3f(Z^2 + 2Z \cdot Z_i + 3Z_i^2)) \quad (2.8)$$

Reissmann 3:

$$c_R = -\frac{d \cdot S^2}{60} * [30b + 20c(Z + 2Z_i) + 3[(5f(Z^2 + 2 * Z * Z_i + 3Z_i^2) + 4g(Z^3 + 2Z^2 * Z_i + 3Z * Z_i^2 + 4Z_i^3))] \quad (2.9)$$

Heer:

$$c_R = -\frac{d \cdot S^2 \cdot b}{(Z - Z_i)^2} \cdot \left(\frac{e^{cZ}}{c} - Z e^{cZ_i} - \frac{e^{cZ_i}}{c} + Z_i e^{cZ_i} \right) \quad (2.10)$$

Kharagani:

$$c_R = -\frac{d \cdot S^2}{(Z - Z_i)^2} \cdot \left[-aZ_i Z + \frac{aZ^2}{2} - bZZ_i^c + \frac{bZ^{c+1}}{c+1} - \left(-aZ_i^2 + \frac{aZ_i^2}{2} - bZ_i^{c+1} + \frac{bZ_i^{c+1}}{c+1} \right) \right] \quad (2.11)$$

όπου:

d : η μεταβολή του συντελεστή διάθλασης n , όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά 1°C :

$$d = -10^{-6}(0.933 - 0.0064(T - 20)) \cdot P/1013$$

P : Η ατμοσφαιρική πίεση (mbar)

Z_i : Το ύψος οργάνου (m)

Z : Η ανάγνωση της σταδίας από το όργανο (m)

S : Η οριζόντια απόσταση μεταξύ του οργάνου και της σταδίας (m)

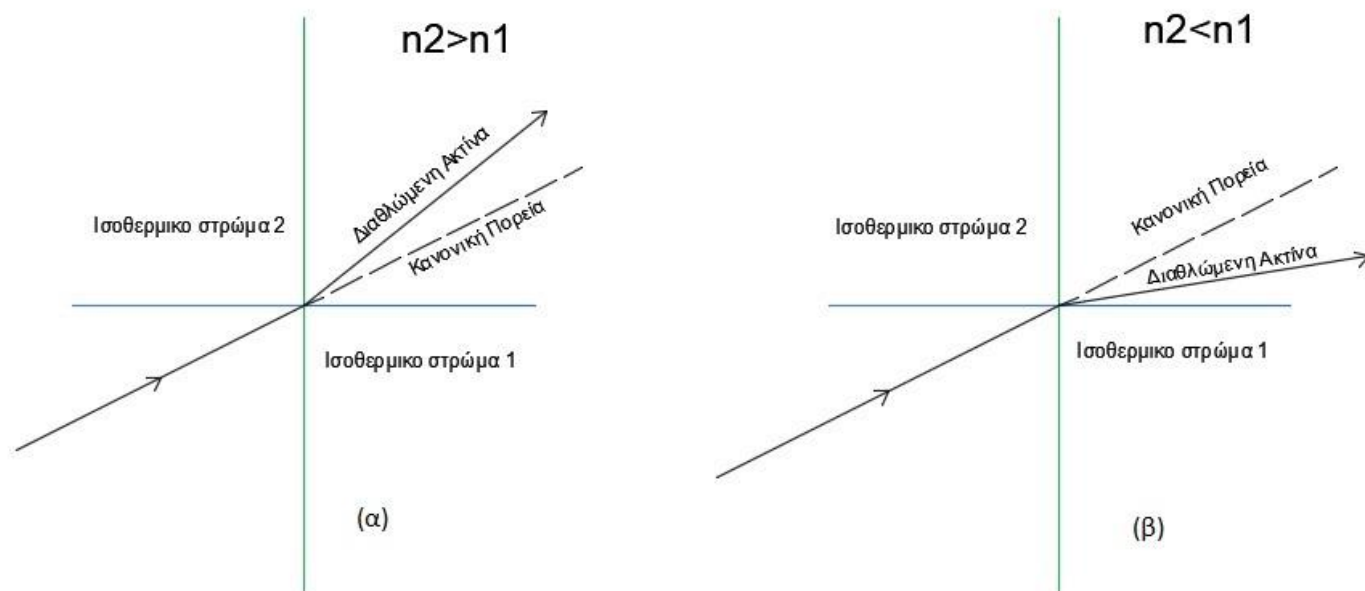
a, b, c, f, g : οι συντελεστές των μοντέλων της θερμοβαθμίδας

2.4 Ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k στη χωροστάθμηση

Κατά την διαδικασία της γεωμετρικής χωροστάθμησης, η οπτική ακτίνα από το όργανο ως την σταδία, διέρχεται μέσα από τα ισοθερμικά στρώματα της ατμόσφαιρας υφιστάμενη το φαινόμενο της διάθλασης. Υπάρχουν δυο περιπτώσεις που διακρίνονται κατά την πορεία της ακτίνας ανάμεσα στα ισοθερμικά στρώματα.

Είτε η ακτίνα να περνά σε στρώμα με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης n από το προηγούμενο με αποτέλεσμα να συγκλίνει στην κατακόρυφο (Σχήμα

2.3α), είτε να περνά σε στρώμα με μικρότερο δείκτη διάθλασης n με αποτέλεσμα να αποκλίνει από την κατακόρυφο (Σχήμα 2.3β).



Σχήμα 2.3 Η διαθλώμενη ακτίνα σε μέσα με διαφορετικό δείκτη διάθλασης

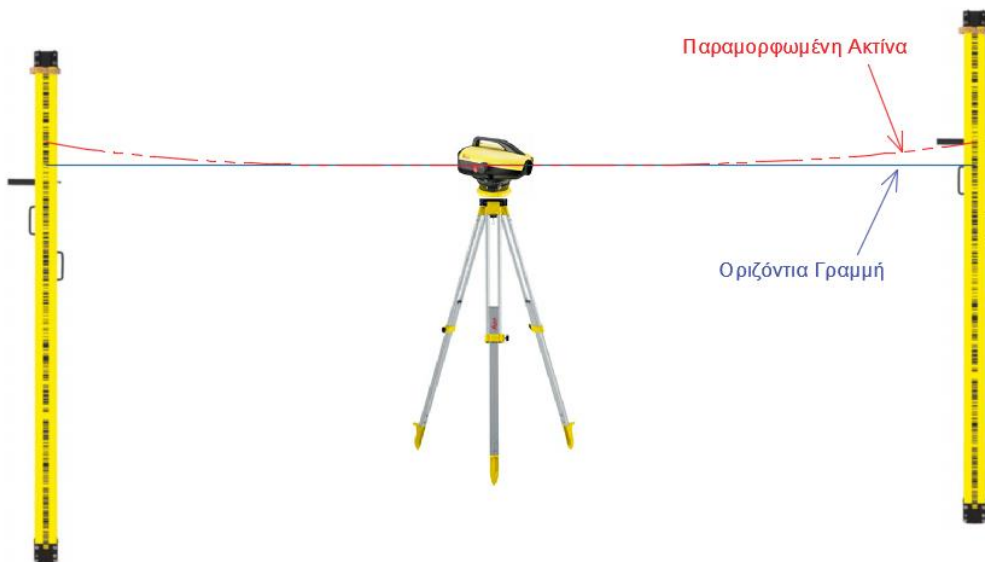
Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω δεδομένα, η πορεία της ακτίνας από το όργανο ως την σταδία σε μια γεωμετρική χωροστάθμηση εξαρτάται άμεσα από τους δείκτες διάθλασης των ισοθερμικών στρωμάτων που διανύει $n_1, n_2, n_3 \dots n_i$.

Όταν η θερμοβαθμίδα της περιοχής είναι θετική, δηλαδή η θερμοκρασία αυξάνεται με την αύξηση του υψομέτρου, τότε η ακτίνα συγκλίνει προς την Γη (Σχήμα 2.4). Αντιθέτως όταν είναι αρνητική, δηλαδή η θερμοκρασία μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου αποκλίνει από την Γη (Σχήμα 2.5).

Όταν λοιπόν η θερμοβαθμίδα είναι θετική, ο παρατηρητής βλέπει τον στόχο χαμηλότερα από ότι είναι στην πραγματικότητα, άρα η διόρθωση στην ανάγνωση της σταδίας λόγω διάθλασης έχει θετικό πρόσημο. Όταν η θερμοβαθμίδα είναι αρνητική ο παρατηρητής βλέπει τον στόχο ψηλότερα από ότι είναι με αποτέλεσμα η διόρθωση λόγω διάθλασης να είναι αφαιρετική.



Σχήμα 2.4 Η πορεία της ακτίνας όταν η θερμοβαθμίδα είναι θετική



Σχήμα 2.5 Η πορεία της ακτίνας όταν η θερμοβαθμίδα είναι αρνητική

Η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο εμπροσθεν και το όπισθεν σημείο με την προσθήκη της διόρθωσης λόγω διάθλασης δίνεται από την σχέση:

$$DH = Z_b + C_b - (Z_f + C_f) = Z_b - Z_f + C_b - C_f \quad (2.12)$$

Όπου Z_b, Z_f η ένδειξη της σταδίας όπισθεν και εμπροσθεν αντίστοιχα και C_b, C_f η διόρθωση λόγω διάθλασης με το αντίστοιχό της πρόσημο.

Σε μια στάση γεωμετρικής χωροστάθμησης στην οποία γίνονται αναγνώσεις όπισθεν και εμπροσθεν, με την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k είναι σταθερός ανάμεσα στο όργανο και τις σταδίες, ο Kharaghani το 1987 απέδειξε πως ο συντελεστής k είναι ανάλογος της διόρθωσης λόγω διάθλασης, της ακτίνας της γης στην συγκεκριμένη περιοχή καθώς και αντιστρόφως ανάλογος του τετραγώνου της οριζόντιας απόστασης μεταξύ σταδίας και χωροβάτη [Kharaghani G., 1987]:

$$k = -\frac{C_R \cdot 2 \cdot R}{S^2} \quad (2.13)$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στην παραπάνω σχέση, προκύπτει το σφάλμα υπολογισμού του δείκτη k από την μέθοδο της θερμοβαθμίδας:

$$\sigma_k = \pm \sqrt{\left(-\frac{2 \cdot R}{S^2}\right)^2 \cdot \sigma_{C_R}^2 + \left(-\frac{2 \cdot C_R}{S^2}\right)^2 \cdot \sigma_R^2 + \left(\frac{4 \cdot C_R \cdot R}{S^3}\right)^2 \cdot \sigma_S^2} \quad (2.14)$$

Από την παραπάνω σχέση παρατηρείται επίσης πως ο συντελεστής διάθλασης k , έχει πρόσημο αντίθετο της διόρθωσης λόγω διάθλασης. Συνοψίζοντας λοιπόν, όταν η θερμοβαθμίδα είναι θετική, η διόρθωση λόγω διάθλασης είναι θετική ενώ ο συντελεστής k είναι αρνητικός. Αντίθετα όταν η θερμοβαθμίδα είναι αρνητική, η διόρθωση λόγω διάθλασης είναι αρνητική ενώ ο συντελεστής k είναι θετικός (Πίνακας 2.2).

$\frac{dT}{dz} > 0$	$c_R > 0$	$k < 0$
$\frac{dT}{dz} < 0$	$c_R < 0$	$k > 0$

Πίνακας 2.2 Σχέση μεταξύ Θερμοβαθμίδας, Διόρθωσης λόγω διάθλασης και Δείκτη Γεωδαιτικής διάθλασης

Σημειώνεται ότι στην σχέση υπολογισμού του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης η διόρθωση λόγω διάθλασης C_R θα μπορούσε να υπολογιστεί από οποιοδήποτε μοντέλο θερμοβαθμίδας ταιριάζει καλύτερα στις συνθήκες που επικρατούν την δεδομένη χρονική στιγμή στην περιοχή μιας πειραματικής εφαρμογής.

Κατά την διαδικασία μιας γεωμετρικής χωροσταθμικής όδευσης με ($i=1..n$) στάσεις οργάνου, υπολογίζεται αρχικά η διόρθωση σε κάθε σκόπευση όπισθεν και έμπροσθεν του χωροβάτη για κάθε στάση με την χρήση του κατάλληλου, για τις δεδομένες συνθήκες της εφαρμογής, μοντέλου της θερμοβαθμίδας.

Ύστερα υπολογίζεται ο συντελεστής k για κάθε σκόπευση όπισθεν και έμπροσθεν με την σχέση 2.13. Ένας μέσος συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k , θα μπορούσε να υπολογισθεί ως ο μέσος όρος των επιμέρους υπολογισθέντων συντελεστών:

$$k_{final} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n k_{b_i}}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n k_{f_i}}{n}}{2} \quad 2.15$$

$$\sigma_{k_{final}} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{\sum_{i=1}^n k_{b_i}}^2 + \sigma_{\sum_{i=1}^n k_{f_i}}^2)} \quad 2.16$$

$$\sigma_{\sum_{i=1}^n k_{b_i}} = \frac{1}{n} \sqrt{(\sigma_{k_{b_1}}^2 + \dots + \sigma_{k_{b_i}}^2)} \quad 2.17$$

$$\sigma_{\sum_{i=1}^n k_{f_i}} = \frac{1}{n} \sqrt{(\sigma_{k_{f_1}}^2 + \dots + \sigma_{k_{f_i}}^2)} \quad 2.18$$

Όπου k_{b_i} και k_{f_i} οι συντελεστές k κάθε ανάγνωσης της σταδίας σε όπισθεν και έμπροσθεν θέση αντίστοιχα. Το σφάλμα του μέσου δείκτη k μιας συγκεκριμένης εφαρμογής γεωμετρικής χωροστάθμησης υπολογίζεται με τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων (Σχέσεις 2.16, 2.17, 2.18).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

3.1 Γενικά

Ο υπολογισμός της θερμοβαθμίδας μπορεί να βοηθήσει στον υπολογισμό του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης k και να διορθώσει τις αναγνώσεις της σταδίας κατά την διαδικασία της γεωμετρικής χωροστάθμησης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορα μοντέλα για τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας.

Κάθε μοντέλο από αυτά υπολογίστηκε σε κάποιες συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και δεδομένου ότι η θερμοβαθμίδα μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή, ακόμα και από στιγμή σε στιγμή, κρίνεται ενδιαφέρον να μελετηθούν και να αξιολογηθούν.

Η βασική ιδέα της συγκεκριμένης πειραματικής εφαρμογής είναι η εκτέλεση μιας σειράς γεωμετρικών χωροσταθμήσεων ακριβείας εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, κατά τις οποίες θα μετρούνται η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία. Έτσι θα υπολογίζεται η θερμοβαθμίδα κατά μήκος της σταδίας σε κάθε σκόπευση, μετρώντας την θερμοκρασία σε συγκεκριμένες αποστάσεις από το έδαφος.

Με τα δεδομένα των πειραμάτων αυτών θα αξιολογηθούν τα υπάρχοντα μοντέλα περνώντας τους απαραίτητους στατιστικούς ελέγχους. Αφού επιλεγθεί το κατάλληλο μοντέλο υπολογισμού της θερμοβαθμίδας, θα διορθωθούν οι αναγνώσεις της σταδίας λόγω διάθλασης, εξαλείφοντας το σφάλμα.

3.2 Σχεδιασμός

Η συγκεκριμένη πειραματική εφαρμογή απαιτεί την πραγματοποίηση σειράς γεωμετρικών χωροσταθμήσεων υψηλής ακρίβειας.

Απαραίτητο κατά τον σχεδιασμό κρίθηκε οι χωροσταθμίσεις αυτές να είναι κλειστές. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η χωροσταθμική όδευση ξεκινάει από ένα σημείο A και πραγματοποιώντας μια σειρά από ενδιάμεσες στάσεις επιστρέφει και καταλήγει στο ίδιο σημείο.

Αυτό δίνει το πλεονέκτημα στον ερευνητή να γνωρίζει την αληθή τιμή της υψομετρικής διαφοράς της χωροσταθμικής όδευσης, η οποία θα είναι ίση με το 0.

Θεωρείται δεδομένο πως προσθέτοντας τις επιμέρους τιμές των υψομετρικών διαφορών των στάσεων, το κλείσιμο δεν θα είναι ίσο με το μηδέν, αλλά θα είναι μια τιμή πολύ κοντά σε αυτό.

Το σφάλμα αυτό του κλεισίματος της χωροστάθμησης οφείλεται κατά κύριο λόγο στην διάθλαση και θα μπορεί να εξαλειφτεί με τον υπολογισμό της διόρθωσης μέσω της θερμοβαθμίδας.

Σημαντική κρίθηκε επίσης η επιλογή του χώρου για την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Για την διερεύνηση διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών κατά την πραγματοποίηση των χωροσταθμίσεων, αποφασίστηκε να γίνουν τρία πειράματα σε χώρους διαφορετικών συνθηκών θερμοκρασίας υγρασίας και πίεσης. Ακόμη απαραίτητη κρίθηκε η ύπαρξη υψομετρικής αφετηρίας (Reper).



Εικόνα 3.1 Reper κτιρίου Λαμπαδαρίου

Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκαν οι εξής χώροι για την πραγματοποίηση των χωροσταθμίσεων:

- Το τούνελ μετρολογικού ελέγχου, στο υπόγειο του κτιρίου Λαμπαδαρίου της Σ.Α.Τ.Μ.
- Ο διάδρομος έξω από τις αίθουσες Λ, του κτιρίου Λαμπαδαρίου της Σ.Α.Τ.Μ.
- Ο περιβάλλοντας χώρος του κτιρίου Λαμπαδαρίου της Σ.Α.Τ.Μ.



Εικόνα 3.2 Τούνελ Μετρολογικού Ελέγχου ΣΑΤΜ

Το τούνελ μετρολογικού ελέγχου έχει συνολικό μήκος 50 μέτρα. Οι αποστάσεις μεταξύ σταδίας και χωροβάτη είναι της τάξεως των 25 μέτρων όταν ο χωροβάτης τοποθετείται στη μεσοκάθετο. Επειδή το σχήμα του μακρόστενου διαδρόμου δεν προσφέρει την πραγματοποίηση μιας πραγματικής κλειστής χωροσταθμικής όδευσης, αποφασίστηκε να γίνει μια προσομοίωση της όδευσης με τον εξής τρόπο (Σχήμα 3.1):

- Στην πρώτη στάση του χωροβάτη το όργανο τοποθετείται στο κέντρο του τούνελ. Η πρώτη όπισθεν ανάγνωση γίνεται στην σταδία η οποία είναι τοποθετημένη στο Reper που βρίσκεται στην μια άκρη του διαδρόμου. Η πρώτη εμπροσθεν ανάγνωση γίνεται στην σταδία που βρίσκεται στο ίδιο άκρο του διαδρόμου.
- Στην δεύτερη στάση του χωροβάτη, το όργανο μετακινείται μια μικρή απόσταση της τάξεως των 1-2 μέτρων και οριζοντιώνεται ξανά. Η δεύτερη σκόπευση όπισθεν πραγματοποιείται στο ίδιο

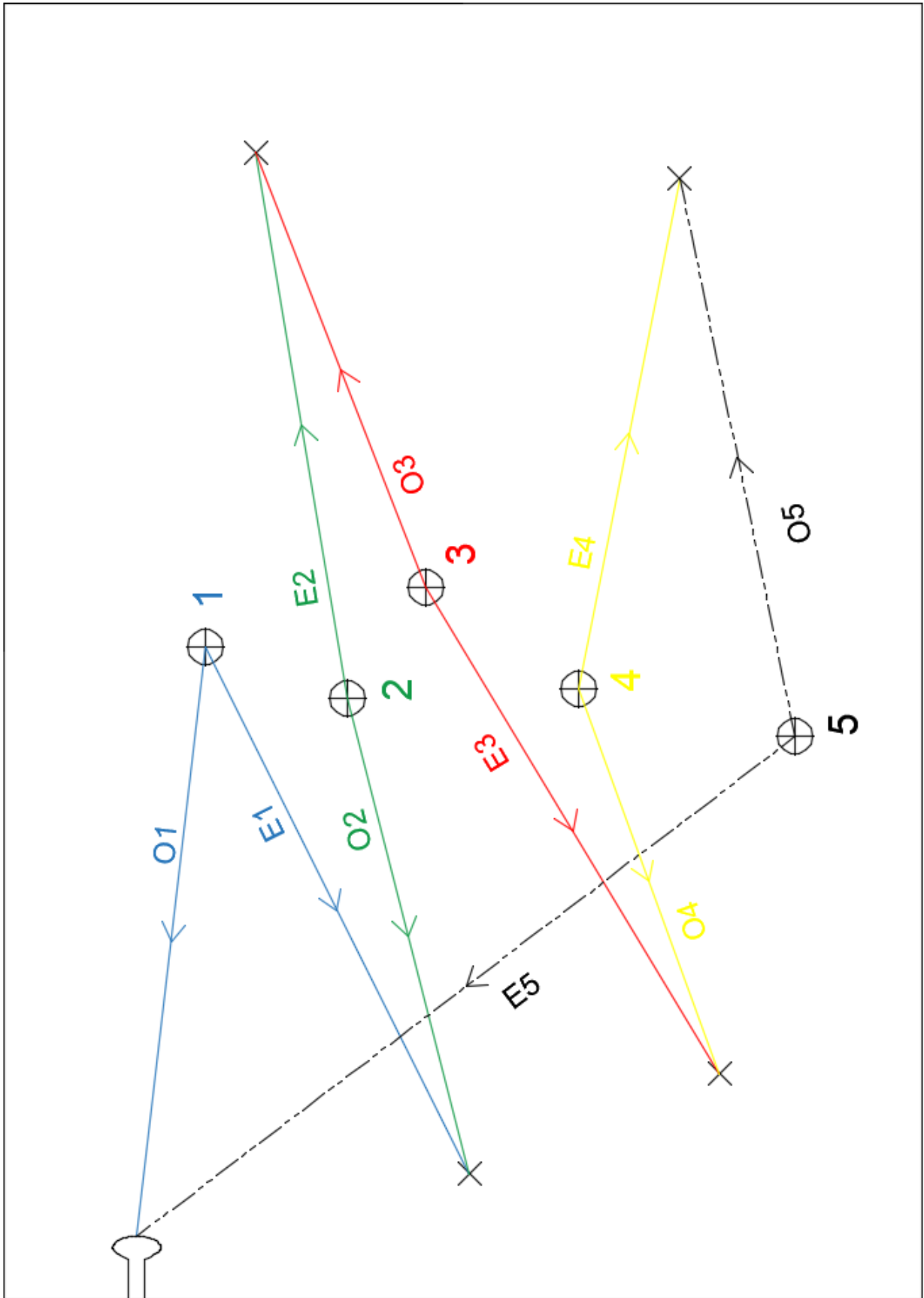
ακριβώς σημείο όπου λήφθηκε η έμπροσθεν ανάγνωση της προηγούμενης στάσης, χωρίς να έχει μετακινηθεί η σταδία. Η δεύτερη έμπροσθεν ανάγνωση λαμβάνεται από ένα νέο σημείο στο άλλο άκρο του τούνελ. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για $i=5$ στάσεις.

- Στην τελευταία στάση, το όργανο μετακινείται και πάλι, οριζοντιώνεται και λαμβάνει ανάγνωση όπισθεν από την θέση έμπροσθεν της προηγούμενης στάσης. Για την τελευταία έμπροσθεν ανάγνωση, επανατοποθετείται η σταδία στο Reper και έτσι πραγματοποιείται το κλείσιμο της χωροστάθμισης.

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και στον διάδρομο έξω από τις αίθουσες Α του κτηρίου Λαμπαδαρίου το οποίο έχει μήκος περίπου 40 μέτρα. Αποφασίστηκε στα εσωτερικά πειράματα να πραγματοποιηθούν 5 στάσεις στο κάθε ένα.



Εικόνα 3.3 Διάδρομος Αιθουσών Α, Κτίριο Λαμπαδάριο



Σχήμα 3.1 Χωροστάθμιση σε εσωτερικούς χώρους

Στον εξωτερικό χώρο αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν τρεις διαφορετικές κλειστές χωροσταθμίσεις.

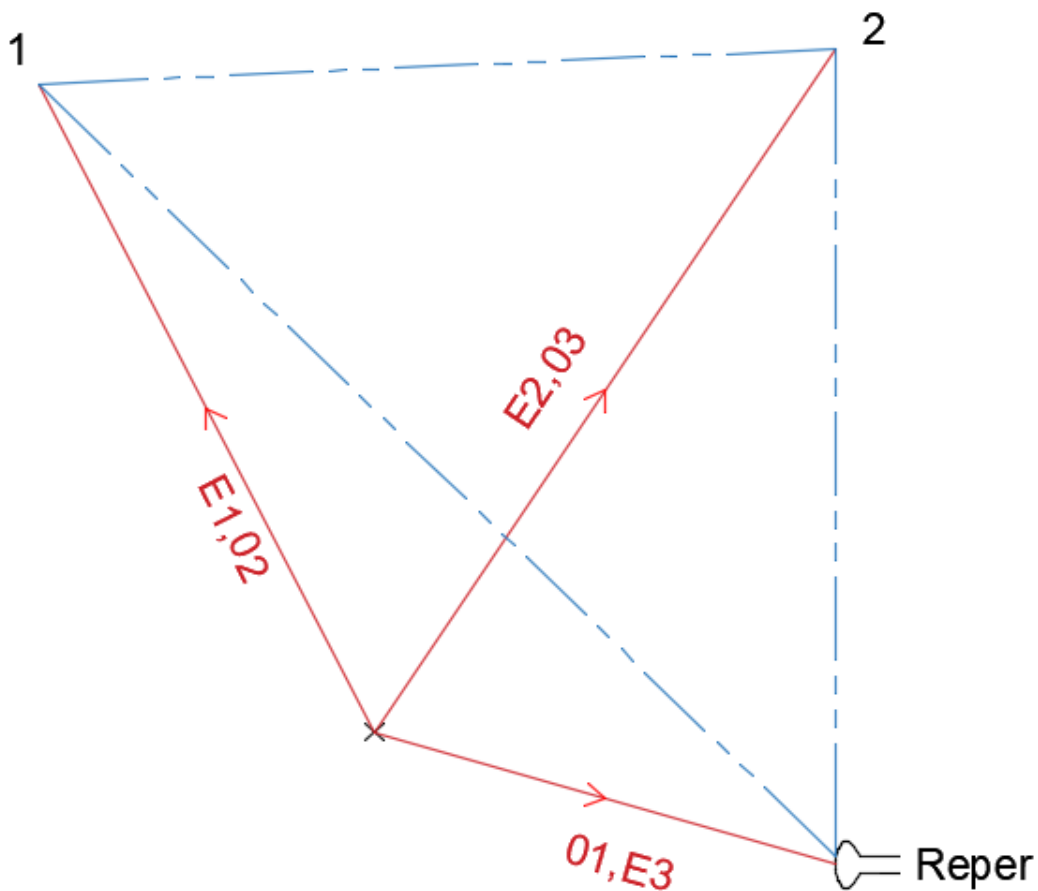
Η πρώτη θα αποτελείται από μικρό αριθμό στάσεων και οι αποστάσεις μεταξύ οργάνου και σταδίας θα είναι της τάξεως το πολύ των 30 μέτρων.

Η δεύτερη εξωτερική χωροσταθμική όδευση θα πραγματοποιούνταν γύρω από το κτίριο Λαμπαδαρίου, με αποστάσεις της τάξεως το πολύ των 60 μέτρων και το πολύ 10 στάσεων. Η τρίτη εξωτερική χωροστάθμιση θα πραγματοποιηθεί ανάμεσα σε τρία σημεία που σχηματίζουν ένα τρίγωνο (Σχήμα 3.2)



Εικόνα 3.4 Εξωτερικός χώρος κτιρίου Λαμπαδαρίου

Την υψομετρική αφετηρία του κτιρίου Λαμπαδαρίου και άλλα δυο σταθερά σημεία στα οποία θα τοποθετηθούν μόνιμα οι χελώνες. Το όργανο τοποθετείται σε μια θέση και πραγματοποιεί τρεις στάσεις, στις οποίες όμως δεν μετακινείται και δεν οριζοντιώνεται ξανά, όπως στις άλλες περιπτώσεις.



Σχήμα 3.2 Χωροστάθμιση «Τρίγωνο»

Στα εξωτερικά πειράματα σκοπίμως ο χωροβάτης δεν θα τοποθετούνταν στη μεσοκάθετο μεταξύ των σταδίων γιατί κάτι τέτοιο πιθανώς θα εξάλειφε το σφάλμα λόγω διάθλασης, το οποίο για τον σκοπό της έρευνας έπρεπε να βρίσκεται μέσα στις μετρήσεις.

Υπομετρική αφετηρία των εξωτερικών χωροσταθμίσεων είναι το Reper στην πρόσοψη του κτηρίου Λαμπαδαρίου (Εικόνα 3.1)

3.3 Εξοπλισμός

Για τα συγκεκριμένα πειράματα επιλέχθηκε ο χωροβάτης DNA03 της Leica (Εικόνα 3.5). Πρόκειται για έναν ψηφιακό χωροβάτη τελευταίας τεχνολογίας και μεγάλης ακρίβειας, που χρησιμοποιείται για πρώτης τάξης μετρήσεις. Μια απλή σταδία, παρέχει ακρίβεια $\pm 1\text{mm}$, ενώ με σταδία

τύπου Invar μετράει με ακρίβεια $\pm 0.3\text{mm}$. Όταν ο χρήστης επιλέγει να κάνει οπτικές μετρήσεις, επιτυγχάνει ακρίβεια $\pm 2\text{mm}$. Στην μέτρηση αποστάσεων επιτυγχάνεται ακρίβεια $\pm 1\text{cm}/20\text{m}$ (500ppm). Το εύρος μέτρησης του είναι από 1.8 έως 110 μέτρα και χρειάζεται περίπου 3 δευτερόλεπτα για να πραγματοποιήσει μια μέτρηση (<http://www.surveyequipment.com>).



Εικόνα 3.5 Χωροβάτης Leica DNA-03

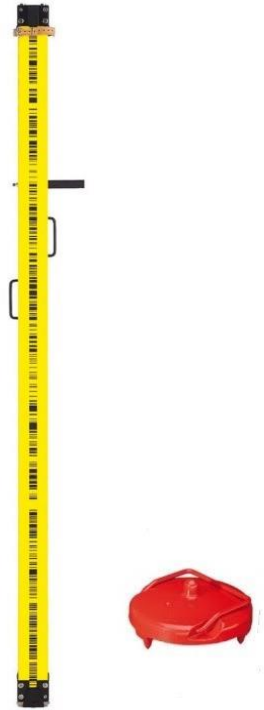
Ο συγκεκριμένος χωροβάτης δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης απλής μοναδικής μέτρησης ακόμη και πολλαπλών διαδοχικών μετρήσεων από τις οποίες μπορεί να εμφανίσει όλες, αλλά και να υπολογίσει την μέση τιμή και τον διάμεσο τους.

Διαθέτει επίσης πολλά προγράμματα μετρήσεων, όπως η απλή μέτρηση και καταγραφή αλλά και η χωροσταθμική όδευση διάφορων τύπων (Όπισθεν-Έμπροσθεν, Όπισθεν-Έμπροσθεν-Έμπροσθεν-Όπισθεν κ.α.). Στα προγράμματα αυτά γίνονται απευθείας όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί δίνοντας το πλεονέκτημα εξοικονόμησης χρόνου αλλά και ελαχιστοποίησης της πιθανότητας χονδροειδούς σφάλματος κατά τους χειροκίνητους υπολογισμούς. Ακόμη διαθέτει προγράμματα ελέγχου “Check and Adjust”, όπως ο έλεγχος του Μέσου και του Άκρου.

Κατά τον έλεγχο Μέσου-Άκρου ελέγχεται η απόκλιση του σκοπευτικού άξονα από την οριζόντια θέση του. Αφού πραγματοποιηθεί ο έλεγχος και υπολογισθεί το σφάλμα του σκοπευτικού άξονα, υπολογίζεται αυτόματα η διόρθωση του, η οποία εφαρμόζεται σε όλες τις μετρήσεις. Τέλος μπορεί

να υπολογίζει την διόρθωση και να εξαλείφει το σφάλμα λόγω καμπυλότητας της γης.

Απαραίτητη είναι η χρήση σταδίων από Invar οι οποίες έχουν ελάχιστο συντελεστή θερμικής διαστολής, εξαλείφοντας έτσι τα σφάλματα της σταδίας. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν σταδίες Professional 5000 από invar της Leica ύψους 2 και 3 μέτρων για τα εσωτερικά και εξωτερικά πειράματα αντίστοιχα.



Εικόνα 3.6 Σταδία από invar της Leica με βάση στήριξης

Απαραίτητα παρελκόμενα ήταν επίσης ένας τρίποδας βιομηχανικής γεωδαισίας για τα εσωτερικά πειράματα αλλά και ένας συμβατικός για τα εξωτερικά. Ακόμη, δυο βάσεις βαρέως τύπου (χελώνες) ώστε να μην μπορούν να μετακινηθούν εύκολα από την θέση που τοποθετούνται. Και τέλος, χρειάστηκαν μια μικρή μετροταινία αλλά και ένα έντυπο χωροστάθμησης για παράλληλη χειροκίνητη καταγραφή των μετρήσεων.

3.4 Οι αισθητήρες της θερμοκρασίας

Για τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας είναι απαραίτητη η ταυτόχρονη μέτρηση της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία καθ' ύψος, πάνω στην

σταδία. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την τοποθέτηση μικρών αισθητήρων μέτρησης θερμοκρασίας σε όλο το μήκος της σταδίας.

Έτσι λοιπόν χρησιμοποιήθηκε ένα σετ 8 αισθητήρων Lord Microstrain Sensing (Εικόνα 3.7)



Εικόνα 3.7 Αισθητήρας Lord MicroStrain

Οι αισθητήρες αυτοί είναι ελαφριοί και αρκετά μικροί σε μέγεθος (63mm x 58mm x 21mm) επιτρέποντας την εύκολη τοποθέτησή τους πάνω στη σταδία.

Μετρούν τη θερμοκρασία με ικανοποιητική ακρίβεια της τάξεως του 0.2°C. Μπορούν να συνδεθούν ασύρματα σε υπολογιστή παρέχοντας σε πραγματικό χρόνο μετρήσεις ενώ έχουν και εσωτερική μνήμη για την καταγραφή πολλών δεδομένων (μέχρι και 500.000 καταγραφές). Παράλληλα μετρούν και την υγρασία. Με το κατάλληλο πρόγραμμα οι μετρήσεις των αισθητήρων μπορούν να μεταφερθούν σε υπολογιστή. Οι αισθητήρες ρυθμίστηκαν ώστε να παίρνουν μια μέτρηση ανά ακέραιο πεντάλεπτο της ώρας ξεκινώντας από 00:00. Διαθέτουν επαναφορτιζόμενη μπαταρία η οποία κρατάει αρκετές ώρες μετά από μια πλήρη φόρτιση (www.microstrain.com)

Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ένα σετ τεσσάρων αισθητήρων TinyTag Plus 2 (Εικόνα 3.8), οι οποίοι διαθέτουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τους

αισθητήρες της Lord παρόλα αυτά έχουν χειρότερη ακρίβεια ($\sim 0.4^{\circ}\text{C}$) (www.geminidataloggers.com).



Εικόνα 3.8 Αισθητήρας TinyTag Plus 2

Για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ακόμη ένας αισθητήρας χειρός με οθόνη ενδείξεων, ο οποίος μετρά θερμοκρασία πίεση και υγρασία. Ο αισθητήρας αυτός εκτός από το ότι παρέχει την ένδειξη της πίεσης, την οποία δεν είχε κανένα από τα άλλα δυο είδη μικρών αισθητήρων, δίνει μια γενική εικόνα για τις συνθήκες που επικρατούν την ώρα των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, ειδική σιλικόνη αλλά και πλαστικά Tire-Ups χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή των αισθητήρων στη σταδία.

3.5 Έλεγχοι και Προετοιμασία

Για την εκτέλεση πειραμάτων μεγάλης ακριβείας είναι απαραίτητος ο έλεγχος του εξοπλισμού πριν τη χρήση του με σκοπό την εξακρίβωση της ορθής λειτουργίας του. Ο χωροβάτης DNA-03 της Leica είναι ένα πολύ ευαίσθητο όργανο και πρέπει να περνά ανά τακτά διαστήματα τεχνικούς και μετρολογικούς ελέγχους. Για τον λόγο αυτό, το όργανο μεταφέρθηκε στις κεντρικές εγκαταστάσεις του αποκλειστικού αντιπροσώπου της εταιρείας στην Ελλάδα ώστε να περάσει τους απαραίτητους ελέγχους.

Μετά το πέρας της διαδικασίας χορηγήθηκε πιστοποιητικό της ορθής λειτουργίας του.

Παράλληλα, σημαντικός κρίθηκε ο έλεγχος του τρόπου λειτουργίας του χωροβάτη και η εξοικείωση μαζί του πριν την έναρξη των χωροσταθμίσεων. Ελέγχθηκε αρχικά ο τρόπος καταγραφής και αποθήκευσης των μετρήσεων.

Επιλέχθηκε οι χωροσταθμίσεις να πραγματοποιηθούν με τη χρήση του προγράμματος Line Levelling σε λειτουργία Back and Fore. Το πρόγραμμα αυτό λαμβάνει τις αναγνώσεις Όπισθεν και Έμπροσθεν από την σταδία για κάθε στάση και πραγματοποιεί όλους τους υπολογισμούς αυτόματα, εμφανίζοντας τους και στην οθόνη αλλά και καταγράφοντας τους στη μνήμη.

Σε κάθε σκόπευση προγραμματίστηκε να πραγματοποιούνται 5 διαδοχικές μετρήσεις και να υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Έγινε δοκιμή μεταφοράς των δεδομένων στον υπολογιστή μέσω του προγράμματος επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων που λαμβάνονται με όργανα της Leica (Leica GeoOffice Tools). Μέσω του Format Manager, προγραμματίστηκε αρχείο format που κατέβαζε από το όργανο τα επιθυμητά δεδομένα. Τα δεδομένα που χρειάζονταν για την επεξεργασία είναι κατά σειρά: Κωδικός σημείου, Είδος Μέτρησης (Όπισθεν, Έμπροσθεν), Ημερομηνία και Ωρα Μέτρησης, Ανάγνωση Σταδίας και Οριζόντια Απόσταση Σταδίας-Οργάνου (Πίνακας 3.1).

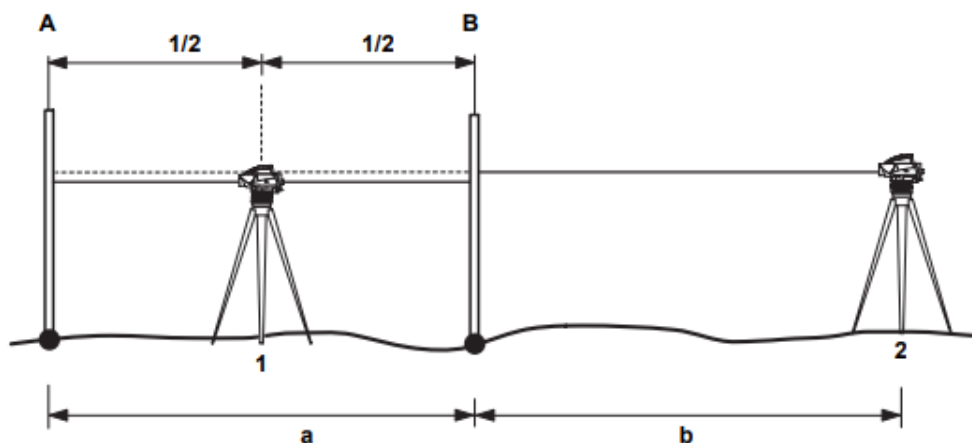
PointID	MeasType	MeasDate	MeasTime	StaffReading	Distance
1	Back	27/09/2017	11:29:13	1.349130	25.82995

Πίνακας 3.1 Format Δεδομένων Χωροβάτη

Επίσης πραγματοποιήθηκε έλεγχος Μέσου-Άκρου. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος Check and Adjust με την μέθοδο $A \times Bx$ με την διαδικασία που πρότεινε ο Kukkamaki.

Οι δυο σταδίες τοποθετούνται σε απόσταση περίπου 20 μέτρων σε δυο σημεία A και B. Αρχικά ο χωροβάτης τοποθετείται στο μέσο της απόστασης του και παίρνει αναγνώσεις όπισθεν(A) και έμπροσθεν(B). Ύστερα τοποθετείται σε απόσταση 20 μέτρων μετά την σταδία B και λαμβάνονται ίδιες ενδείξεις (Σχήμα 3.3). Το όργανο υπολογίζει την

διόρθωση, την αποθηκεύει και την εφαρμόζει σε όλες τις μετρήσεις. Μετά την εκτέλεση του ελέγχου Μέσου-Άκρου η διόρθωση υπολογίστηκε στα - 2.9arcsec.

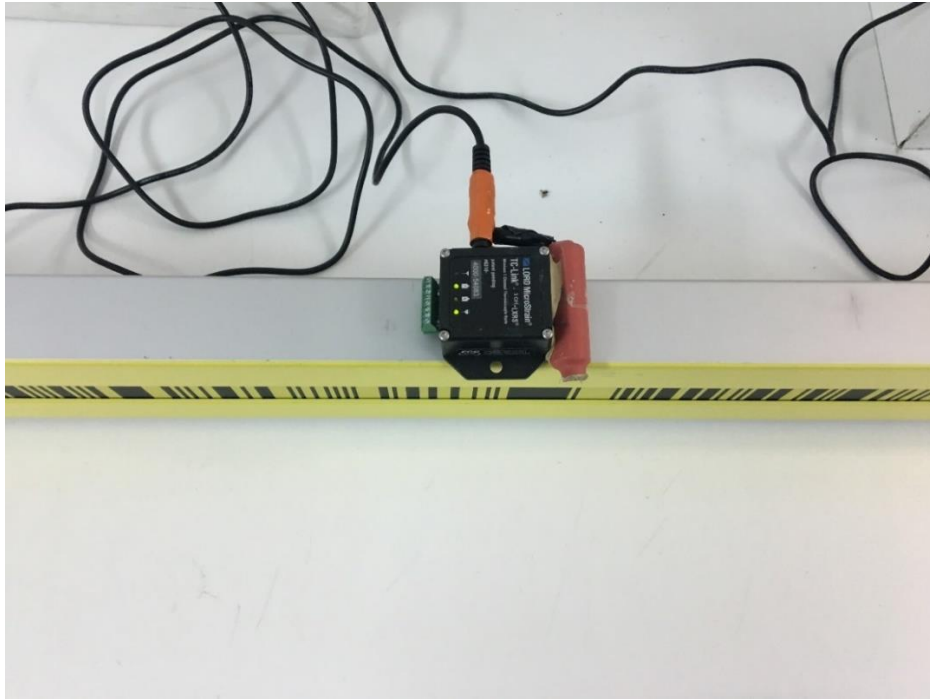


Σχήμα 3.3 Έλεγχος Μέσου-Άκρου

Τέλος, οι αισθητήρες της θερμοκρασίας πριν χρησιμοποιηθούν, πέρασαν όλοι τους την διαδικασία της βαθμονόμησης σε ειδικό θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας εντός του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την βεβαίωση της ορθής λειτουργίας τους. Ο έλεγχος των αισθητήρων έγινε σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Με αυτό το τρόπο υπολογίσθηκαν οι διορθώσεις για κάθε έναν και εφαρμόστηκαν στο πρόγραμμα με το οποίο επεξεργάζονται τα δεδομένα. Επίσης ρυθμίστηκε το ρολόι των αισθητήρων και συγχρονίστηκε με αυτό του χωροβάτη καθώς είναι μεγάλης σημασίας οι μετρήσεις των αισθητήρων να είναι ταυτόχρονες με αυτές του οργάνου.

Αφού ολοκληρώθηκαν οι απαραίτητοι έλεγχοι τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες στην δίμετρη σταδία (Εικόνα 3.9). Χρησιμοποιήθηκαν οι έξι αισθητήρες της Lord Microstrain με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όλο το εύρος της. Οι θέσεις που τοποθετήθηκαν πάνω στη σταδία είναι στα 0.00, 0.38, 0.72, 1.11, 1.49 και 2.00 μέτρα. Τέλος τοποθετήθηκαν στη φόρτιση ώστε η μπαταρία τους να είναι πλήρης την ημέρα των μετρήσεων.



Εικόνα 3.9 Τοποθέτηση αισθητήρων στην σταδία

3.6 Μετρήσεις

3.6.1 Μετρήσεις Εσωτερικού Χώρου

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε δύο μέρες. Την πρώτη μέρα εκτελέστηκαν οι εσωτερικές και την δεύτερη οι εξωτερικές χωροσταθμίσεις.

1η Εσωτερική χωροστάθμιση (Τούνελ)

Ο χωροβάτης ρυθμίστηκε στο πρόγραμμα Line Levelling, με τύπο μέτρησης Mean για $n=5$ μετρήσεις. Οι αισθητήρες λάμβαναν μέτρηση κάθε ακέραιο πεντάλεπτο της ώρας. Έτσι λοιπόν, η πρώτη όπισθεν ανάγνωση λήφθηκε λίγα δευτερόλεπτα πριν τις 11:30:00, καθώς απαιτείται και κάποιος επιπλέον χρόνος για πραγματοποίηση πέντε διαδοχικών μετρήσεων.

Έτσι ξεκίνησε η χωροσταθμική όδευση όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.2. Κάθε σκόπευση λαμβανόταν όσο δυνατό πιο κοντά στο ακέραιο πεντάλεπτο της ώρας. Κατά την διάρκεια όλης της διαδικασίας

μετρούνταν το ύψος οργάνου από το έδαφος αλλά και η ατμοσφαιρική πίεση με τη χρήση του αισθητήρα χειρός. Στις συμβατικές χωροστάθμησεις δεν απαιτείται η γνώση του ύψους οργάνου, αλλά στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό της διόρθωσης λόγω διάθλασης από την σχέση 2.4. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά την πρώτη εσωτερική χωροστάθμηση παρουσιάζονται στους πίνακες 3.2 και 3.3.



Εικόνα 3.10 Πρώτη εσωτερική χωροστάθμηση

POINTID	MEASTYPE	MEASDATE	MEASTIME	INSTRHEIGHT	STAFFREADING	DISTANCE
1	Back	27/09/2017	11:29:13	1.56	1.349130	25.82995
1	Fore	27/09/2017	11:31:11	1.56	1.485586	24.83010
2	Back	27/09/2017	11:34:31	1.56	1.487623	25.22164
2	Fore	27/09/2017	11:37:21	1.56	1.329198	23.99481
3	Back	27/09/2017	11:39:06	1.56	1.330627	23.74767
3	Fore	27/09/2017	11:40:39	1.56	1.350368	21.81215
4	Back	27/09/2017	11:44:10	1.56	1.349207	22.06345
4	Fore	27/09/2017	11:46:53	1.56	1.479346	24.38774
5	Back	27/09/2017	11:50:25	1.56	1.479593	24.17220
5	Fore	27/09/2017	11:51:47	1.56	1.351687	25.99985

Πίνακας 3.2 Αρχείο καταγραφής χωροβάτη πρώτης εσωτερικής χωροστάθμησης

Η υψομετρική διαφορά μιας χωροσταθμικής όδευσης για $i=n$ στάσεις υπολογίζεται ως εξής:

$$DH = \sum_{i=1}^n (O_i - E_i) \quad (3.1)$$

Όπου O_i και E_i οι αναγνώσεις της σταδίας σε Όπισθεν και Έμπροσθεν θέση αντίστοιχα. Το κλείσιμο της παραπάνω χωροστάθμησης ήταν στα $-5\mu\text{m}$.

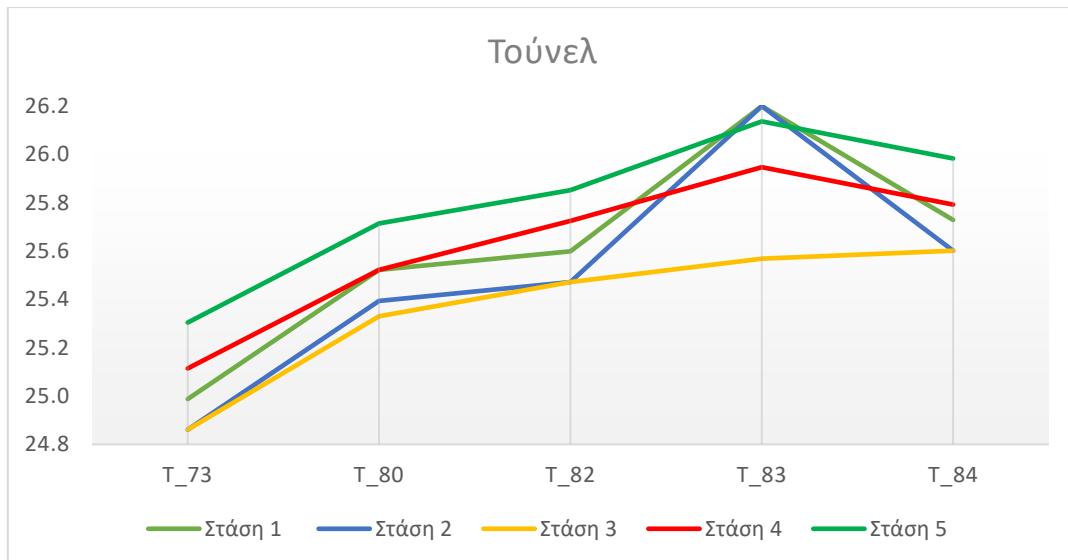
Κατά την διαδικασία ανάκτησης των δεδομένων της θερμοκρασίας, παρατηρήθηκε πως ο αισθητήρας που βρισκόταν στο κάτω μέρος της σταδίας δεν λειτουργούσε την ώρα των μετρήσεων. Έτσι λοιπόν τα δεδομένα που κατέγραψαν οι αισθητήρες είναι τα εξής:

	SENSOR ID:	T_73	T_80	T_82	T_83	T_84
POINT ID	SensorHeight:	0.38	0.72	1.11	1.49	2.00
1	Back	25.0	25.5	25.6	26.2	25.7
1	Fore	25.0	25.5	25.6	26.2	25.7
2	Back	24.9	25.4	25.5	26.2	25.6
2	Fore	24.9	25.4	25.5	26.2	25.6
3	Back	24.9	25.3	25.5	25.6	25.6
3	Fore	24.9	25.3	25.5	25.6	25.6
4	Back	25.1	25.5	25.7	25.9	25.8
4	Fore	25.1	25.5	25.7	25.9	25.8
5	Back	25.3	25.7	25.9	26.1	26.0
5	Fore	25.3	25.7	25.9	26.1	26.0

Πίνακας 3.3 Αρχείο καταγραφής αισθητήρων πρώτης εσωτερικής χωροστάθμησης

Οι αναγνώσεις όπισθεν και έμπροσθεν σε κάθε στάση λαμβάνονταν στο ίδιο ακέραιο πεντάλεπτο της ώρας καθώς η μετακίνηση του οργάνου ήταν μικρή και η οριζοντίωση του πραγματοποιούνταν πολύ γρήγορα χάρη στη χρήση του βιομηχανικού τρίποδα.

Στο διάγραμμα 3.1 φαίνεται ξεκάθαρα ότι η θερμοβαθμίδα μέσα στο τούνελ μετρολογικού ελέγχου την συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι θετική, κάτι που σημαίνει ότι και η διόρθωση λόγω διάθλασης θα είναι επίσης θετική, ενώ ο συντελεστής k θα είναι αρνητικός.



Διάγραμμα 3.1 Η θερμοβαθμίδα σε κάθε στάση της πρώτης εσωτερικής χωροστάθμησης

2η Εσωτερική Χωροστάθμηση (Διάδρομος)

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και στον διάδρομο έξω από τις αίθουσες Λ του κτιρίου Λαμπαδαρίου. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά την δεύτερη εσωτερική χωροστάθμηση παρουσιάζονται στους πίνακες 3.4 και 3.5.

POINTID	MEASTYPE	MEASDATE	MEASTIME	INSTRHEIGHT	STAFFREADING	DISTANCE
1	Back	27/09/2017	12:24:55	1.52	1.181342	20.01136
1	Fore	27/09/2017	12:26:11	1.52	1.427132	18.93415
2	Back	27/09/2017	12:28:30	1.52	1.426633	19.08817
2	Fore	27/09/2017	12:30:39	1.52	1.415663	20.22072
3	Back	27/09/2017	12:34:21	1.52	1.416670	20.29359
3	Fore	27/09/2017	12:35:50	1.52	1.413447	21.99855
4	Back	27/09/2017	12:38:35	1.52	1.413178	22.30202
4	Fore	27/09/2017	12:40:36	1.52	1.428927	19.0082
5	Back	27/09/2017	12:44:07	1.52	1.429463	19.1423
5	Fore	27/09/2017	12:45:16	1.52	1.182091	19.89536

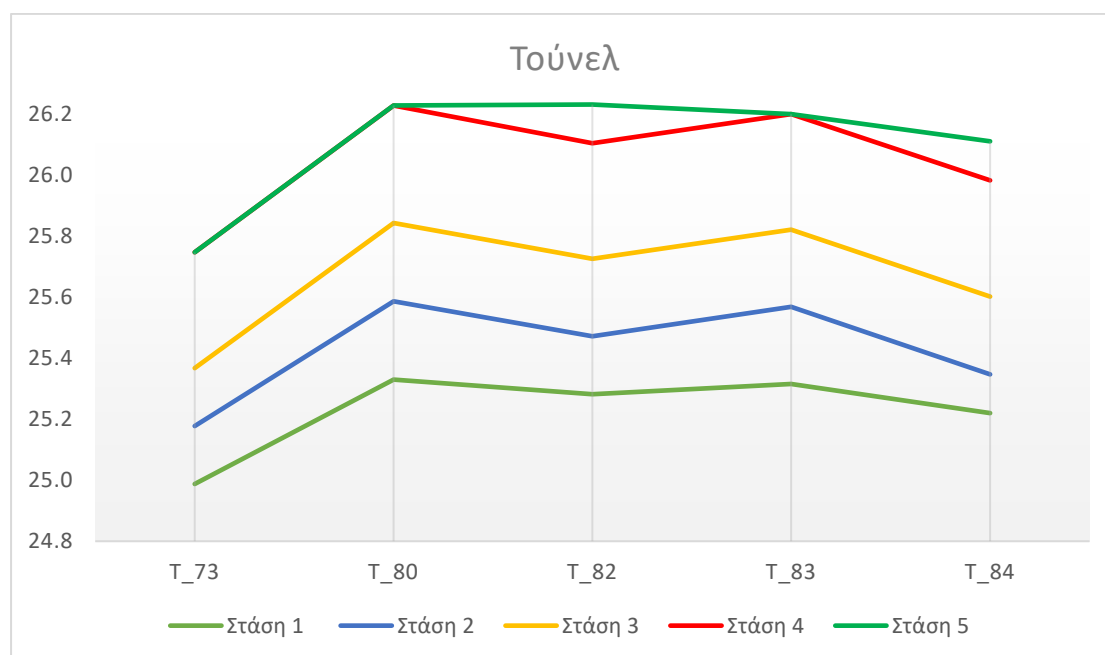
Πίνακας 3.4 Αρχείο καταγραφής χωροβάτη δεύτερης εσωτερικής χωροστάθμησης

Η παραπάνω χωροστάθμηση έκλεισε με σφάλμα +0.03mm. Οι θερμοκρασίες την στιγμή κάθε σκόπευσης όπως καταγράφηκαν από τους πέντε διαθέσιμους αισθητήρες είναι:

Sensor ID:		T_73	T_80	T_82	T_83	T_84
Point ID	SensorHeight:	0.38	0.72	1.11	1.49	2.00
1	Back	25.0	25.3	25.3	25.3	25.2
1	Fore	25.0	25.3	25.3	25.3	25.2
2	Back	25.2	25.6	25.5	25.6	25.3
2	Fore	25.2	25.6	25.5	25.6	25.3
3	Back	25.4	25.8	25.7	25.8	25.6
3	Fore	25.4	25.8	25.7	25.8	25.6
4	Back	25.7	26.2	26.1	26.2	26.0
4	Fore	25.7	26.2	26.1	26.2	26.0
5	Back	25.7	26.2	26.2	26.2	26.1
5	Fore	25.7	26.2	26.2	26.2	26.1

Πίνακας 3.5 Δεδομένα αισθητήρων δεύτερης εσωτερικής χωροστάθμησης

Στο διάγραμμα 3.2 φαίνεται ότι η θερμοβαθμίδα του διαδρόμου δεν μπορεί να χαρακτηριστεί θετική ή αρνητική καθώς η θερμοκρασία παρουσιάζει μια ανώμαλη μεταβολή κατά μήκος της σταδίας. Σε κάθε στάση, η θερμοκρασία ξεκινά να ανεβαίνει όσο ανεβαίνει το υψόμετρο, κάνει μια μικρή πτώση, ύστερα μια μικρή άνοδο και τέλος άλλη μια μικρή πτώση.



Διάγραμμα 3.2 Η Θερμοβαθμίδα σε κάθε στάση της δεύτερης εσωτερικής χωροστάθμησης

Τέλος τα δεδομένα των ατμοσφαιρικών συνθηκών που καταγράφηκαν από τον αισθητήρα χειρός παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6.

ΩΡΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΠΙΕΣΗ (MBAR)	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)
11:00	25.66	1003.1	61.0
12:00	25.80	1004.1	61.6
12:26	27.75	1003.0	46.1
12:45	28.12	1002.6	44.6

Πίνακας 3.6 Δεδομένα Καταγραφής Αισθητήρα Χειρός

3.6.2 Μετρήσεις Εξωτερικού Χώρου

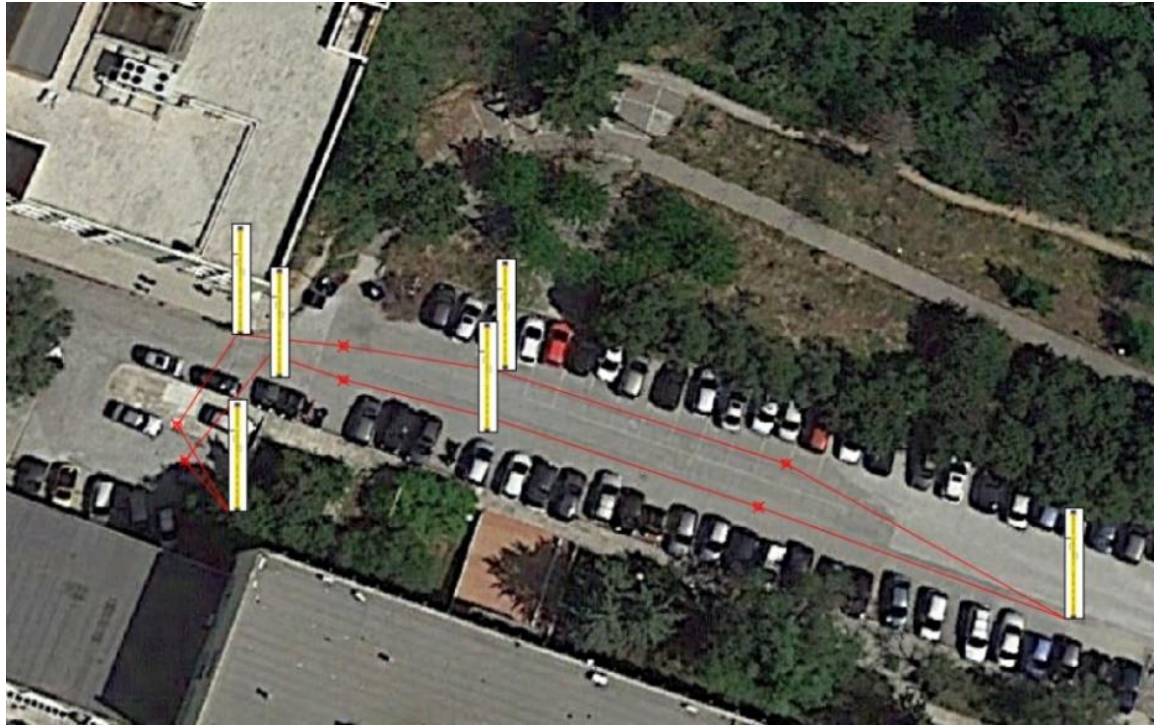
Για την εκτέλεση των χωροσταθμίσεων στον εξωτερικό χώρο, ελέγχθηκε η μετεωρολογική πρόβλεψη για να αποφευχθούν πιθανές βροχές ή ισχυροί άνεμοι, δηλαδή συνθήκες που θα δυσχεραίνουν την εκτέλεση των προγραμματισμένων χωροσταθμίσεων. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στην τρίμετρη σταδία η οποία επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί στις εξωτερικές χωροσταθμίσεις. Τοποθετήθηκαν επτά αισθητήρες της Lord Microstrain στις θέσεις της σταδίας 0.00, 0.56, 1.06, 1.56, 2.06, 2.56, 3.00 m (Εικόνα 3.11)



Εικόνα 3.11 Προσαρμογή των αισθητήρων στην τρίμετρη σταδία

1^η Εξωτερική Χωροστάθμιση (Μικρή)

Η πρώτη χωροστάθμιση πραγματοποιήθηκε στον εξωτερικό χώρο του κτιρίου Λαμπαδαρίου σε έξι στάσεις, με αποστάσεις μεταξύ σταδίας και χωροβάτη μέχρι 30 μέτρων. (Σχήμα 3.4)



Σχήμα 3.4 Πρώτη Εξωτερική Χωροστάθμηση



Εικόνα 3.12 Πρώτη Εξωτερική Χωροστάθμηση

Τα δεδομένα της πρώτης εξωτερικής χωροστάθμησης παρουσιάζονται στους πίνακες 3.7 και 3.8.

POINTID	MEASTYPE	MEASDATE	MEASTIME	INSTRHEIGHT	STAFFREADING	DISTANCE
1	Back	18/10/2017	11:15:51	1.41	0.702480	7.9
1	Fore	18/10/2017	11:21:27	1.41	1.208190	14.5
2	Back	18/10/2017	11:29:35	1.44	1.799820	8.9
2	Fore	18/10/2017	11:33:55	1.44	0.928540	15.2
3	Back	18/10/2017	11:39:41	1.45	1.882350	30.7
3	Fore	18/10/2017	11:44:29	1.45	1.401440	34.7
4	Back	18/10/2017	11:46:30	1.45	1.440460	34.0
4	Fore	18/10/2017	11:54:29	1.45	1.921230	32.1
5	Back	18/10/2017	11:59:55	1.49	0.933260	16.2
5	Fore	18/10/2017	12:14:58	1.49	1.846520	8.5
6	Back	18/10/2017	12:16:58	1.50	1.319910	12.2
6	Fore	18/10/2017	12:22:34	1.50	0.772190	10.6

Πίνακας 3.7 Αρχείο καταγραφής χωροβάτη πρώτης εξωτερικής χωροστάθμησης

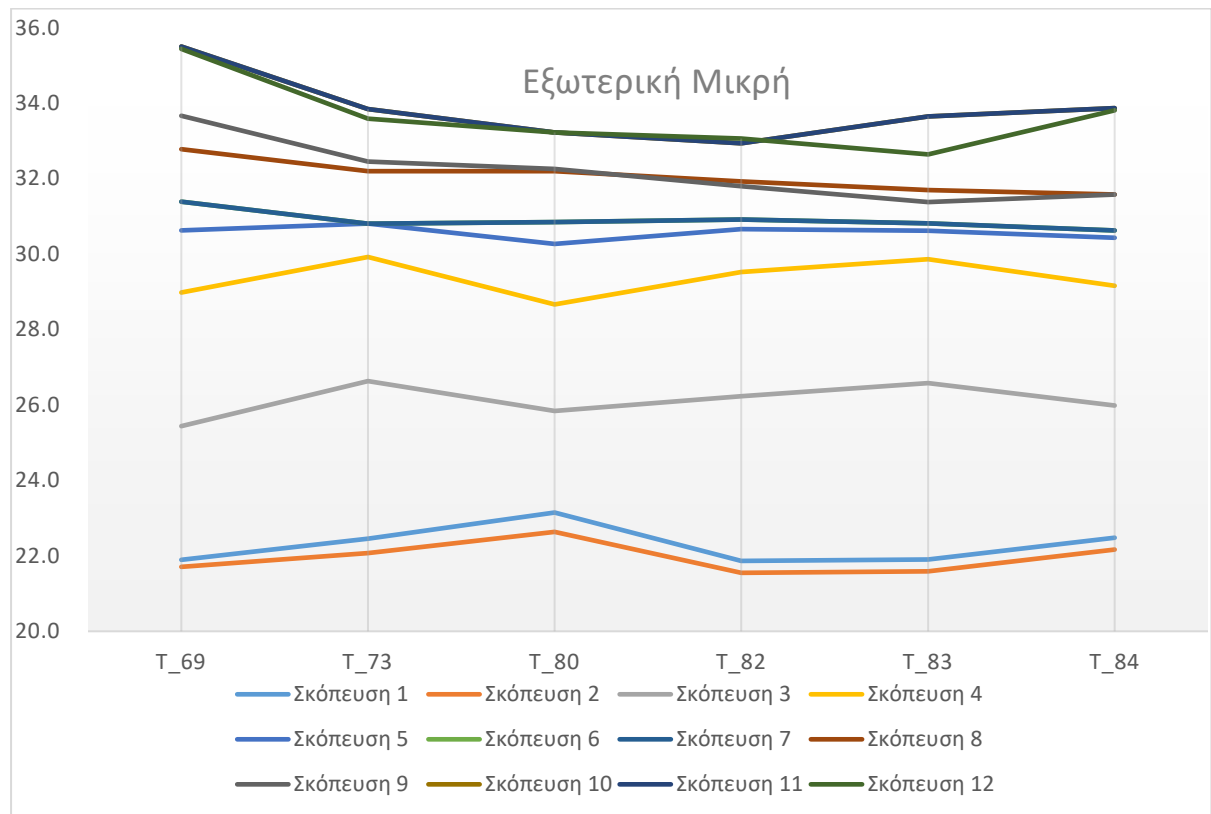
Η παραπάνω χωροστάθμηση έκλεισε με σφάλμα +170 μ m. Και αυτή τη φορά ο αισθητήρας που τοποθετήθηκε στην θέση 1.56 της σταδίας δεν λειτούργησε κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας που καταγράφηκαν από τους υπόλοιπους αισθητήρες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

	SENSOR ID:	T_69	T_73	T_80	T_82	T_83	T_84
POINT ID	SensorHeight:	0	0.56	1.06	2.06	2.56	3.00
1	Back	21.9	22.5	23.1	21.9	21.9	22.5
1	Fore	21.7	22.1	22.6	21.5	21.6	22.2
2	Back	25.4	26.6	25.8	26.2	26.6	26.0
2	Fore	29.0	29.9	28.7	29.5	29.9	29.2
3	Back	30.6	30.8	30.3	30.7	30.6	30.4
3	Fore	31.4	30.8	30.8	30.9	30.8	30.6
4	Back	31.4	30.8	30.8	30.9	30.8	30.6
4	Fore	32.8	32.2	32.2	31.9	31.7	31.6
5	Back	33.7	32.5	32.3	31.8	31.4	31.6
5	Fore	35.5	33.8	33.2	32.9	33.7	33.9
6	Back	35.5	33.8	33.2	32.9	33.7	33.9
6	Fore	35.4	33.6	33.2	33.1	32.6	33.8

Πίνακας 3.8 Αρχείο καταγραφής αισθητήρων πρώτης εξωτερικής χωροστάθμησης

Στο διάγραμμα 3.3 παρατηρείται ανώμαλη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος της σταδίας, με αποτέλεσμα να μην φαίνεται ξεκάθαρα αν είναι θετική ή αρνητική η θερμοβαθμίδα. Φαίνεται μάλιστα να δημιουργούνται κάποια υποσύνολα σκοπεύσεων στις οποίες η

θερμοκρασία παρουσιάζει παρόμοια μεταβολή. Αυτά είναι οι σκοπεύσεις 1-2, οι 3-4-5, οι 9-10 και οι 11-12

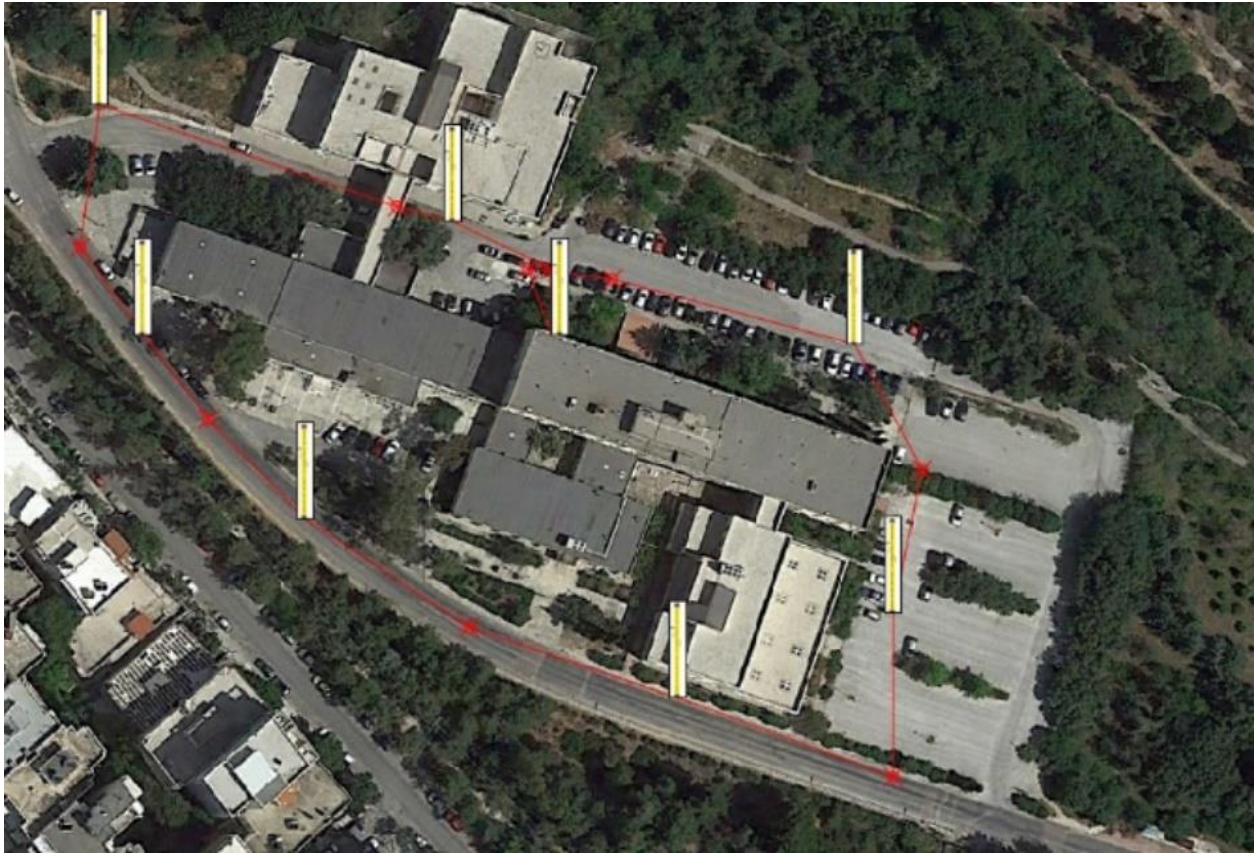


Διάγραμμα 3.3 Η Θερμοβαθμίδα κάθε σκόπευσης στην πρώτη εξωτερική χωροστάθμηση

2^η Εξωτερική Χωροστάθμηση (Μεγάλη)

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε σε μεγαλύτερη κλίμακα, πραγματοποιώντας περισσότερες στάσεις, μεγαλύτερων αποστάσεων. Ξεκινώντας από την ίδια υψομετρική αφετηρία η όδευση ακολούθησε την περίμετρο του κτιρίου Λαμπαδάριου κάνοντας 9 στάσεις και κατέληξε στο ίδιο Reper (Σχήμα 3.5). Οι θέσεις που τοποθετήθηκε η σταδία κατά μήκος όλης της χωροσταθμικής όδευσης κάλυπταν ένα σχετικά μεγάλο εύρος συνθηκών θερμοκρασίας πίεσης και υγρασίας.

Το σφάλμα κλεισίματος της δεύτερης εξωτερικής χωροστάθμησης ήταν +800μm. Τα δεδομένα καταγραφής του χωροβάτη της δεύτερης εξωτερικής χωροστάθμησης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.9.



Σχήμα 3.5 Δεύτερη Εξωτερική Χωροστάθμιση

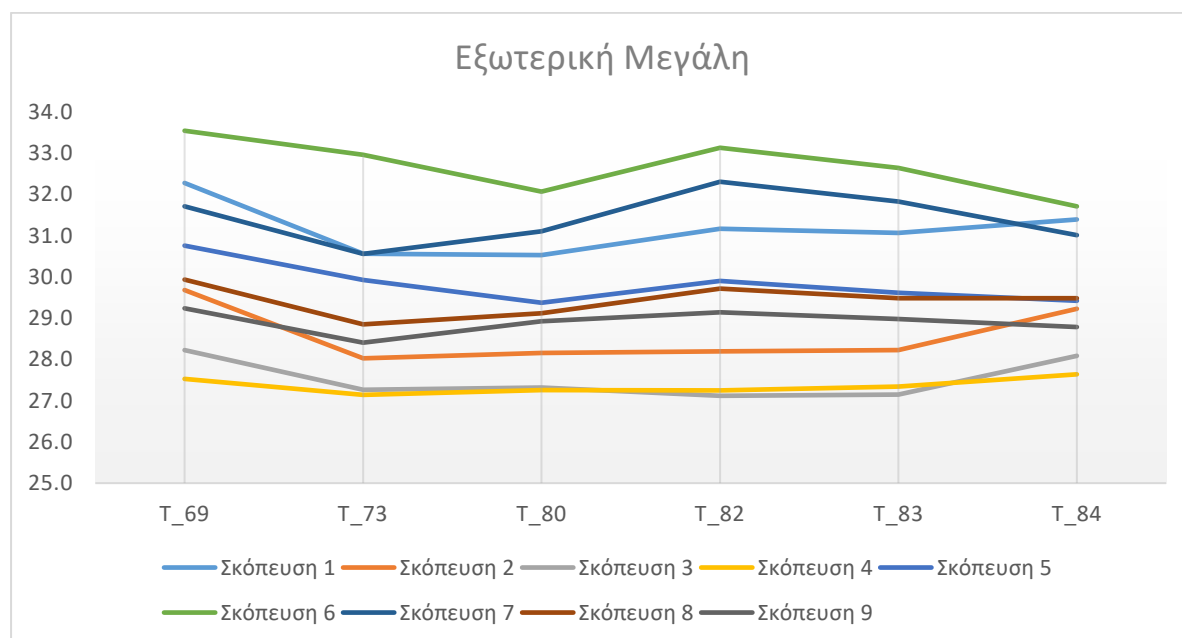
POINTID	MEASTYPE	MEASDATE	MEASTIME	INSTRHEIGHT	STAFFREADING	DISTANCE
1	Back	18/10/2017	13:14:24	1.43	0.730512	12.3252
1	Fore	18/10/2017	13:19:25	1.43	1.260243	23.9739
2	Back	18/10/2017	13:23:13	1.47	0.963850	11.0876
2	Fore	18/10/2017	13:29:48	1.47	2.904591	61.4606
3	Back	18/10/2017	13:32:25	1.44	1.607035	29.393
3	Fore	18/10/2017	13:41:14	1.44	0.292493	22.2748
4	Back	18/10/2017	13:44:40	1.46	2.621550	22.1897
4	Fore	18/10/2017	13:49:51	1.46	0.400992	28.091
5	Back	18/10/2017	13:55:50	1.41	2.955644	40.5884
5	Fore	18/10/2017	14:02:33	1.41	0.544382	45.6375
6	Back	18/10/2017	14:06:09	1.55	1.242543	47.8794
6	Fore	18/10/2017	14:10:46	1.55	2.268016	34.2122
7	Back	18/10/2017	14:14:33	1.60	0.301153	30.0223
7	Fore	18/10/2017	14:19:18	1.60	1.743208	29.0368
8	Back	18/10/2017	14:21:53	1.56	0.787913	52.4925
8	Fore	18/10/2017	14:27:15	1.56	2.357263	16.9987
9	Back	18/10/2017	14:29:38	1.55	1.383356	10.9584
9	Fore	18/10/2017	14:34:38	1.55	0.821522	10.7102

Πίνακας 3.9 Αρχείο καταγραφής χωροβάτη δεύτερης εσωτερικής χωροστάθμισης

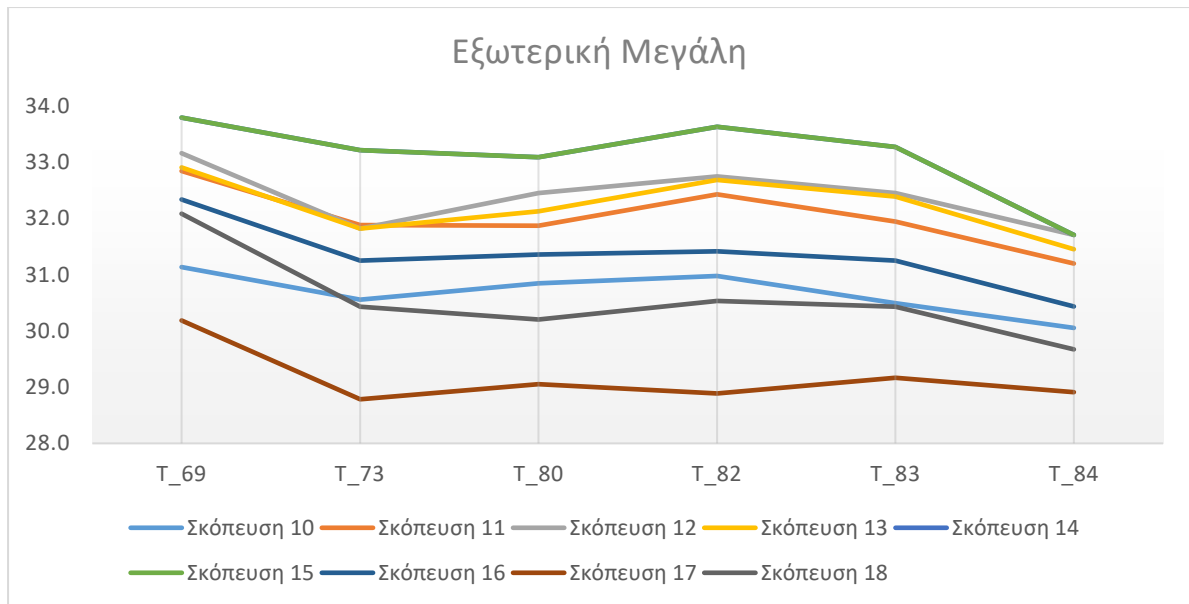
Τα δεδομένα που κατέγραψαν οι 6 αισθητήρες στην διάρκεια του δεύτερου εξωτερικού πειράματος παρουσιάζονται στον πίνακα 3.10.

SENSOR ID:		T_69	T_73	T_80	T_82	T_83	T_84
POINT ID	SensorHeight:	0	0.56	1.06	2.06	2.56	3
1	Back	32.3	30.6	30.5	31.2	31.1	31.4
1	Fore	29.7	28.0	28.2	28.2	28.2	29.2
2	Back	28.2	27.3	27.3	27.1	27.1	28.1
2	Fore	27.5	27.1	27.3	27.2	27.3	27.6
3	Back	30.8	29.9	29.4	29.9	29.6	29.4
3	Fore	33.5	33.0	32.1	33.1	32.6	31.7
4	Back	31.7	30.6	31.1	32.3	31.8	31.0
4	Fore	29.9	28.8	29.1	29.7	29.5	29.5
5	Back	29.2	28.4	28.9	29.1	29.0	28.8
5	Fore	31.1	30.6	30.8	31.0	30.5	30.1
6	Back	32.8	31.9	31.9	32.4	31.9	31.2
6	Fore	33.2	31.8	32.5	32.7	32.5	31.7
7	Back	32.9	31.8	32.1	32.7	32.4	31.5
7	Fore	33.8	33.2	33.1	33.6	33.3	31.7
8	Back	33.8	33.2	33.1	33.6	33.3	31.7
8	Fore	32.3	31.3	31.4	31.4	31.3	30.4
9	Back	30.2	28.8	29.1	28.9	29.2	28.9
9	Fore	32.1	30.4	30.2	30.5	30.4	29.7

Πίνακας 3.10 Αρχείο Καταγραφής Αισθητήρων δεύτερης εξωτερικής χωροστάθμησης



Διάγραμμα 3.4 Η θερμοβαθμίδα της δεύτερης εξωτερικής χωροστάθμησης (Σκοπεύσεις 1-9)



Διάγραμμα 3.5 Η θερμοβαθμίδα της δεύτερης εξωτερικής χωροστάθμησης (Σκοπεύσεις 10-18)

Στα διαγράμματα 3.4 και 3.5 φαίνεται πως σε όλες τις σκοπεύσεις η θερμοκρασία έχει πτωτική τάση από κάτω μέχρι την μέση της σταδίας, ανεβαίνει λίγο και ύστερα αρχίζει πάλι την πτώση. Και σε αυτή την περίπτωση δεν μπορεί να χαρακτηριστεί καθαρά θετική ή αρνητική η θερμοβαθμίδα μέσω του διαγράμματος.

3^η Εξωτερική Χωροστάθμηση (Τρίγωνο)

Η τελευταία εξωτερική χωροστάθμηση πραγματοποιήθηκε μεταξύ της χωροσταθμικής αφετηρίας του κτηρίου Λαμπαδαρίου και δύο ακόμη σταθερών σημείων. Ο χωροβάτης δεν μετακινήθηκε από το σημείο που τοποθετήθηκε και πραγματοποίησε τρεις πλασματικές στάσεις (Σχήμα 3.2). Οι καταγραφές του χωροβάτη στην τρίτη εξωτερική χωροστάθμηση παρουσιάζονται στον πίνακα 3.11

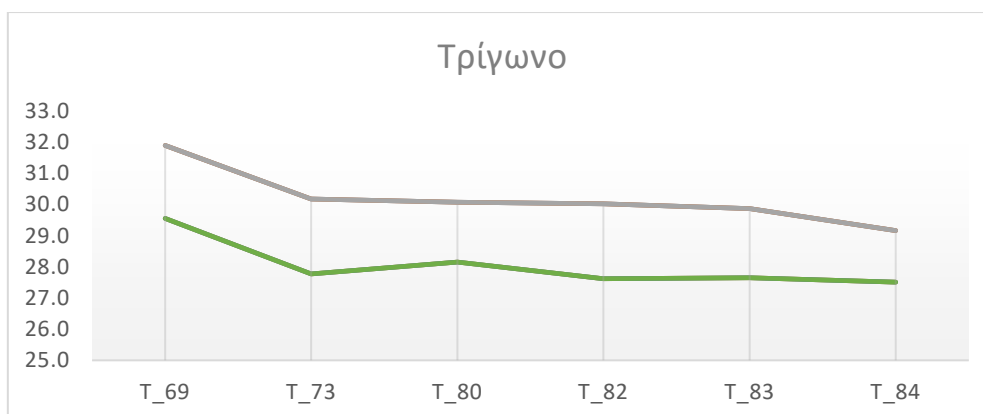
POINTID	MEASTYPE	MEASDATE	MEASTIME	INSTRHEIGHT	STAFFREADING	DISTANCE
1	Back	18/10/2017	14:38:35	1.55	0.821420	10.7103
1	Fore	18/10/2017	14:40:46	1.55	0.409786	25.8909
2	Back	18/10/2017	14:41:30	1.55	0.409782	25.8871
2	Fore	18/10/2017	14:43:38	1.55	1.223474	23.1615
3	Back	18/10/2017	14:44:02	1.55	1.223452	23.1581
3	Fore	18/10/2017	14:46:24	1.55	0.821564	10.7158

Πίνακας 3.11 Αρχείο Καταγραφής χωροβάτη τρίτης εξωτερικής χωροστάθμησης

Η παραπάνω χωροστάθμιση έκλεισε με σφάλμα -170 μ m. Τα δεδομένα καταγραφής της θερμοκρασίας της τρίτης και τελευταίας εξωτερικής χωροστάθμισης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.12.

SENSOR ID:		T_69	T_73	T_80	T_82	T_83	T_84
POINT ID	SensorHeight:	0	0.56	1.06	2.06	2.56	3
1	Back	31.9	30.2	30.1	30.0	29.9	29.2
1	Fore	31.9	30.2	30.1	30.0	29.9	29.2
2	Back	31.9	30.2	30.1	30.0	29.9	29.2
2	Fore	29.6	27.8	28.2	27.6	27.7	27.5
3	Back	29.6	27.8	28.2	27.6	27.7	27.5
3	Fore	29.6	27.8	28.2	27.6	27.7	27.5

Πίνακας 3.12 Αρχείο Καταγραφής αισθητήρων τρίτης εξωτερικής χωροστάθμισης



Διάγραμμα 3.6 Η θερμοβαθμίδα στην τρίτη εξωτερική χωροστάθμιση

Φαίνεται πως η θερμοβαθμίδα κατά την τελευταία εξωτερική χωροστάθμιση είναι αρνητική, καθώς η θερμοκρασία κατά μήκος της σταδίας ακολουθεί πτωτική πορεία και στις έξι σκοπεύσεις. Κατά την διάρκεια των εξωτερικών πειραμάτων καταγράφονταν ανά τακτά διαστήματα οι ενδείξεις του αισθητήρα χειρός για θερμοκρασία πίεση και υγρασία, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 3.13

ΩΡΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (C)	ΠΙΕΣΗ (MBAR)	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)
11:40	30.7	1003.5	26.0
12:25	25.8	1003.8	33.5
13:15	27.7	1002.8	39.9
13:55	25.7	1003.0	32.5
14:50	30	1001.9	29.8

Πίνακας 3.13 Δεδομένα καταγραφής αισθητήρα χειρός

3.7 Επεξεργασία και αξιολόγηση δεδομένων

Πριν την επεξεργασία και την πραγματοποίηση των απαραίτητων υπολογισμών, αναγκαία κρίνεται η αξιολόγηση των πρωτογενών δεδομένων που παρήχθησαν σε αυτή τη φάση από τον χωροβάτη και τους αισθητήρες αλλά και των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν

Αρχικά παρατηρείται ότι όλες οι χωροσταθμίσεις κλείνουν με πολύ μικρό σφάλμα. Το μεγαλύτερο σφάλμα είναι τα 0.8mm της μεγάλης εξωτερικής χωροστάθμησης. Η διαδικασία των χωροσταθμίσεων πραγματοποιήθηκε με επιτυχία. Οι δυο εσωτερικές χωροσταθμίσεις έχουν πάρα πολύ μικρό σφάλμα κλεισίματος της τάξεως μερικών μm το οποίο ίσως να υποδεικνύει πως το σφάλμα λόγω διάθλασης έχει εξαλειφθεί λόγω της τοποθέτησης του χωροβάτη στο μέσο της απόστασης των δυο σταδίων.

Επίσης παρατηρώντας τα διαγράμματα της θερμοβαθμίδας, φαίνεται πως κατά μήκος της σταδίας η θερμοκρασία δεν ακολουθεί μια ομαλή πορεία όπως ήταν αναμενόμενο αλλά παρουσιάζει κάποιες αυξομειώσεις άλλοτε μεγαλύτερες και άλλοτε μικρότερες. Η μορφή του διαγράμματος της θερμοβαθμίδας, ειδικά στα εξωτερικά πειράματα φαίνεται πως μεταβάλλεται ακόμη και ανάμεσα σε δυο σκοπεύσεις όπισθεν-έμπροσθεν.

Με αφορμή τις παραπάνω παρατηρήσεις αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί μια επαναληπτική σειρά πειραμάτων, ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό, με πιο αυστηρές και προσεχτικές διαδικασίες οι οποίες θα διορθώσουν τις αστοχίες των πρώτων εφαρμογών.

Στα νέα αυτά πειράματα πρόκειται να τηρηθεί μια σειρά προϋποθέσεων, οι οποίες εκτιμήθηκε πως θα λύσουν τα προβλήματα που προέκυψαν στην πρώτη σειρά πειραμάτων. Τα βασικά σημεία που άλλαξαν στην νέα επαναληπτική διαδικασία είναι:

- Ο χωροβάτης να μην τοποθετείται στην μεσοκάθετο της απόστασης των δυο σταδίων. Η απόσταση του χωροβάτη από την μια θέση σταδίας να είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με την δεύτερη θέση.
- Έλεγχος της ορθής λειτουργίας όλων των αισθητήρων πριν την έναρξη της χωροστάθμησης, καθώς όπως φάνηκε από την συλλογή των δεδομένων καταγραφής, ορισμένοι δεν λειτουργούσαν
- Η κάθε χωροστάθμηση να έχει τουλάχιστον 10 στάσεις.

- Να χρησιμοποιηθούν και οι 8 αισθητήρες της Lord Microstrain ενώ παράλληλα να τοποθετηθούν και οι 4 TinyTag για επιπλέον έλεγχο των μετρήσεων
- Ο χωροβάτης να παίρνει 20 μοναδιαίες αναγνώσεις και να υπολογίζεται ο μέσος όρος τους ως τιμή της μέτρησης. Με αυτό τον τρόπο καλύπτεται η επαναληψιμότητα των μετρήσεων του χωροβάτη.
- Σε κάθε μετακίνηση της σταδίας, πριν την σκόπευση, αναμονή τουλάχιστον 5 λεπτών για τον εγκλιματισμό των αισθητήρων στην νέα θέση. Από την βαθμονόμηση, φάνηκε πως ο κάθε αισθητήρας χρειάζεται τουλάχιστον 5 λεπτά για να προσαρμοστεί στην θερμοκρασία ενός νέου περιβάλλοντος.
- Οι σκοπεύσεις του χωροβάτη να γίνονται αυστηρά σε ακέραιο πεντάλεπτο της ώρας, δηλαδή ταυτόχρονα με την καταγραφή των αισθητήρων.
- Κατά την διάρκεια των μετρήσεων οι αισθητήρες δεν θα πρέπει να είναι συνδεδεμένοι στο ρεύμα γιατί πιθανώς αυτό να αυξάνει τη θερμοκρασία τους.
- Απομάκρυνση των σταδιοφόρων από την σταδία μετά την τοποθέτηση της. Η ανθρώπινη παρουσία κοντά στην σταδία επηρεάζει τις μετρήσεις των αισθητήρων.
- Ο προσδιορισμός της θέσης των αισθητήρων στη σταδία να γίνεται πιο προσεκτικά και με ακρίβεια χιλιοστού
- Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και το ύψος της χελώνας κατά τους υπολογισμούς, καθώς για τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας, απαιτείται η γνώση της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένες αποστάσεις από το έδαφος.

3.8 Επαναληπτική Σειρά Πειραμάτων

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω σημεία που προέκυψαν από την αξιολόγηση της πρώτης σειράς μετρήσεων, πραγματοποιήθηκαν δυο νέες χωροσταθμίσεις μια εσωτερική και μια εξωτερική.

Η πρώτη πραγματοποιήθηκε στο ισόγειο του κτηρίου Λαμπαδαρίου κάνοντας 10 στάσεις της τάξεως των 30 μέτρων και η δεύτερη στον

περιβάλλοντα χώρο πραγματοποιώντας επίσης 10 στάσεις της τάξεως των 50 μέτρων.

Στην εσωτερική χωροστάθμηση τοποθετήθηκαν 8 αισθητήρες Lord Microstrain στην δίμετρη σταδία στις θέσεις 0.1, 0.352, 0.625, 0.926, 1.205, 1.488, 1.769, 2.032.

Τα δεδομένα της επαναληπτικής εσωτερικής χωροστάθμησης παρουσιάζονται στους πίνακες 3.14 και 3.15.

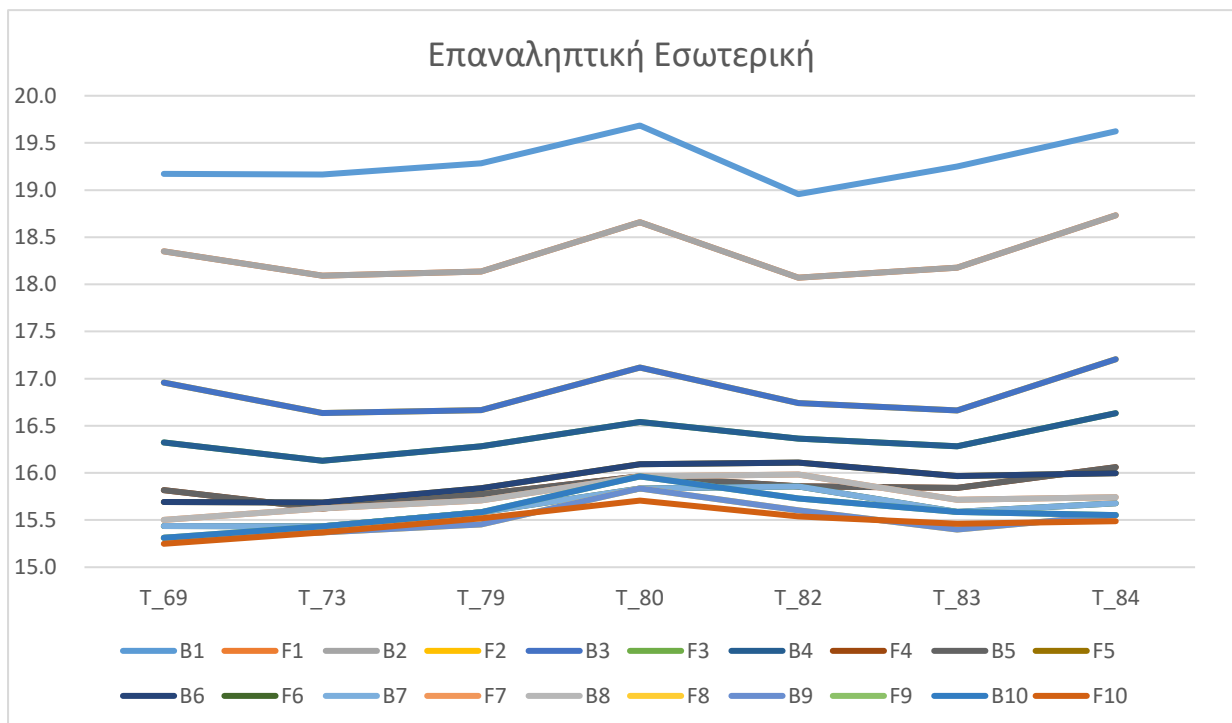
POINTID	MEASTYPE	MEASDATE	MEASTIME	INSTRHEIGHT	STAFFREADING	DISTANCE
1	Back	28/12/2017	13:05:43	1.59	1.502457	17.423720
1	Fore	28/12/2017	13:10:40	1.59	1.505600	28.768525
2	Back	28/12/2017	13:12:01	1.59	1.506897	28.142090
2	Fore	28/12/2017	13:19:57	1.59	1.505208	13.937550
3	Back	28/12/2017	13:21:12	1.59	1.504358	13.261924
3	Fore	28/12/2017	13:30:24	1.59	1.514997	31.687055
4	Back	28/12/2017	13:31:52	1.59	1.513718	27.874636
4	Fore	28/12/2017	13:40:21	1.59	1.500293	18.124480
5	Back	28/12/2017	13:41:42	1.59	1.500860	16.321885
5	Fore	28/12/2017	13:50:22	1.59	1.521128	34.717948
6	Back	28/12/2017	13:51:41	1.59	1.520128	33.557005
6	Fore	28/12/2017	13:59:52	1.59	1.496198	8.024691
7	Back	28/12/2017	14:01:09	1.59	1.495053	9.401807
7	Fore	28/12/2017	14:10:35	1.59	1.512042	27.035502
8	Back	28/12/2017	14:12:02	1.59	1.513391	27.771711
8	Fore	28/12/2017	14:19:57	1.59	1.502498	17.316852
9	Back	28/12/2017	14:21:13	1.59	1.500181	18.618211
9	Fore	28/12/2017	14:30:24	1.59	1.504793	23.164763
10	Back	28/12/2017	14:31:38	1.59	1.507053	25.558413
10	Fore	28/12/2017	14:40:13	1.59	1.500985	20.139752

Πίνακας 3.14 Αρχείο καταγραφής χωροβάτη επαναληπτικής εσωτερικής χωροστάθμησης

Η επαναληπτική εσωτερική χωροστάθμηση έκλεισε με σφάλμα 360μm. Τα δεδομένα καταγραφής των αισθητήρων στην επαναληπτική εσωτερική χωροστάθμηση είναι:

SENSOR ID:		T_69	T_73	T_79	T_80	T_82	T_83	T_84
POINT ID	SensorHeight:	0.100	0.352	0.625	0.926	1.488	1.769	2.032
1	Back	19.2	19.2	19.3	19.7	19.0	19.3	19.6
1	Fore	18.4	18.1	18.1	18.7	18.1	18.2	18.7
2	Back	18.4	18.1	18.1	18.7	18.1	18.2	18.7
2	Fore	17.0	16.6	16.7	17.1	16.7	16.7	17.2
3	Back	17.0	16.6	16.7	17.1	16.7	16.7	17.2
3	Fore	16.3	16.1	16.3	16.5	16.4	16.3	16.6
4	Back	16.3	16.1	16.3	16.5	16.4	16.3	16.6
4	Fore	15.8	15.6	15.8	16.0	15.9	15.8	16.1
5	Back	15.8	15.6	15.8	16.0	15.9	15.8	16.1
5	Fore	15.7	15.7	15.8	16.1	16.1	16.0	16.0
6	Back	15.7	15.7	15.8	16.1	16.1	16.0	16.0
6	Fore	15.4	15.4	15.6	15.8	15.9	15.6	15.7
7	Back	15.4	15.4	15.6	15.8	15.9	15.6	15.7
7	Fore	15.5	15.6	15.7	16.0	16.0	15.7	15.7
8	Back	15.5	15.6	15.7	16.0	16.0	15.7	15.7
8	Fore	15.3	15.4	15.5	15.8	15.6	15.4	15.6
9	Back	15.3	15.4	15.5	15.8	15.6	15.4	15.6
9	Fore	15.3	15.4	15.6	16.0	15.7	15.6	15.6
10	Back	15.3	15.4	15.6	16.0	15.7	15.6	15.6
10	Fore	15.2	15.4	15.5	15.7	15.5	15.5	15.5

Πίνακας 3.15 Αρχείο καταγραφής αισθητήρων επαναληπτικής εσωτερικής χωροστάθμησης



Διάγραμμα 3.7 Η θερμοβαθμίδα της επαναληπτικής εσωτερικής χωροστάθμησης

Στην εξωτερική χωροστάθμηση τοποθετήθηκαν οι ίδιοι αισθητήρες στις θέσεις 0.105, 0.492, 0.924, 1.347, 1.774, 2.204, 2.637, 3.057. Τα δεδομένα από την επαναληπτική εξωτερική χωροστάθμηση παρουσιάζονται στους πίνακες 3.16 και 3.17.

POINTID	MEASTYPE	MEASDATE	MEASTIME	INSTRHEIGHT	STAFFREADING	DISTANCE
1	Back	29/12/2017	13:06:19	1.515	1.559778	8.92791
1	Fore	29/12/2017	13:14:43	1.515	1.174905	44.94268
2	Back	29/12/2017	13:19:45	1.515	1.374113	9.57780
2	Fore	29/12/2017	13:25:30	1.515	0.704989	40.27847
3	Back	29/12/2017	13:29:41	1.485	1.368433	15.30908
3	Fore	29/12/2017	13:35:29	1.485	1.960964	23.03736
4	Back	29/12/2017	13:37:14	1.465	2.349947	36.31181
4	Fore	29/12/2017	13:50:35	1.465	0.965590	15.25633
5	Back	29/12/2017	13:55:04	1.49	0.580341	30.00004
5	Fore	29/12/2017	14:00:01	1.49	1.356151	12.93509
6	Back	29/12/2017	14:01:35	1.485	1.291802	9.10057
6	Fore	29/12/2017	14:09:51	1.485	1.963260	41.45567
7	Back	29/12/2017	14:11:30	1.47	1.390099	14.41559
7	Fore	29/12/2017	14:20:01	1.47	1.517749	50.93253
8	Back	29/12/2017	14:22:31	1.475	1.512432	19.21068
8	Fore	29/12/2017	14:29:45	1.475	1.923054	50.73002
9	Back	29/12/2017	14:31:31	1.445	1.655319	14.85031
9	Fore	29/12/2017	14:39:58	1.445	2.007497	29.59192
10	Back	29/12/2017	14:41:31	1.475	1.668327	7.81215
10	Fore	29/12/2017	14:49:57	1.475	1.178767	21.57982

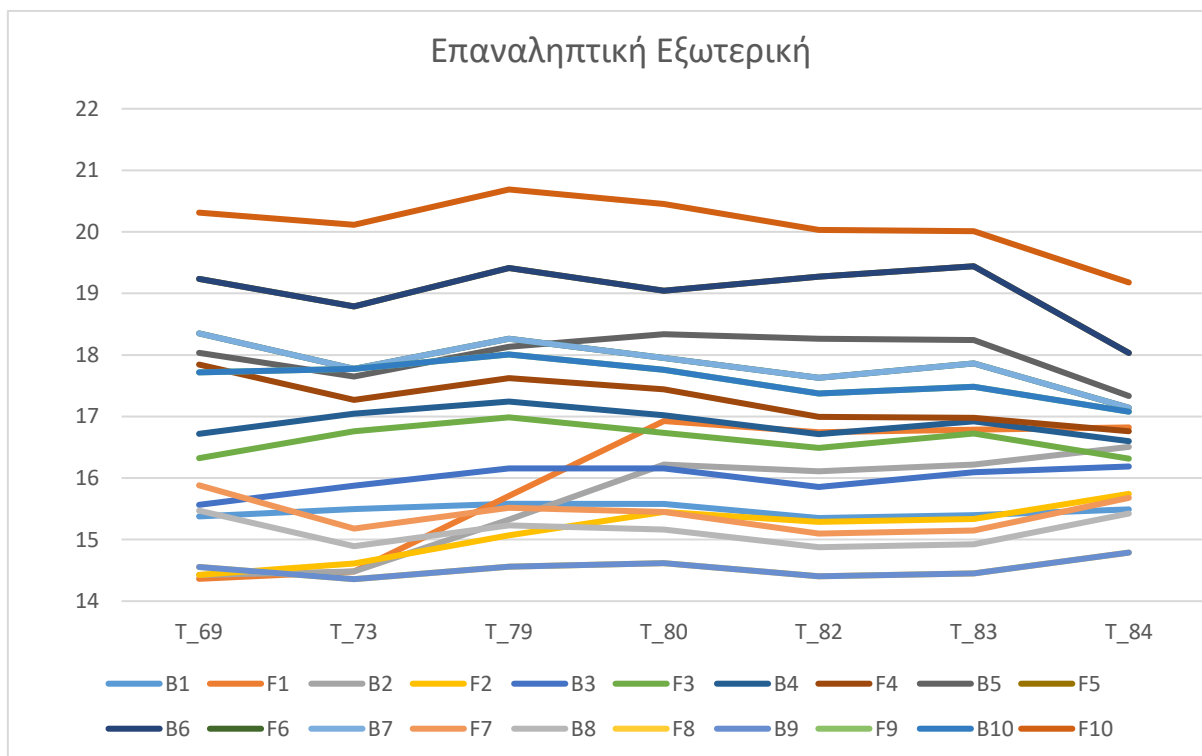
Πίνακας 3.16 Αρχείο καταγραφής χωροβάτης επαναληπτικής εξωτερικής χωροστάθμησης

Στην εξωτερική χωροστάθμηση το σφάλμα κλεισίματος ήταν -2,34mm λόγω των μεγάλων αποστάσεων και των αρκετών διαφορετικών σημείων που πραγματοποιήθηκαν οι στάσεις οργάνου, η θερμοβαθμίδα παρουσιάζει αρκετά διαφορετική συμπεριφορά σε κάθε μια από αυτές, σε αντίθεση με την εσωτερική χωροστάθμηση στην οποία παρατηρείται μια ομοιομορφία (Διάγραμμα 3.8).

Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως ορισμένα γκρουπ σκοπεύσεων έχουν παρόμοια καμπύλη θερμοβαθμίδας, καθιστώντας δυνατή την ομαδοποίηση τους για περισσότερη μελέτη της συμπεριφοράς της θερμοκρασίας.

SENSOR ID:		T_69	T_73	T_79	T_80	T_82	T_83	T_84
POINT ID	SensorHeight:	0.105	0.492	0.924	1.347	2.204	2.637	3.057
1	Back	15.4	15.5	15.6	15.6	15.4	15.4	15.5
1	Fore	14.4	14.5	15.7	16.9	16.7	16.8	16.8
2	Back	14.4	14.5	15.3	16.2	16.1	16.2	16.5
2	Fore	14.4	14.6	15.1	15.5	15.3	15.3	15.7
3	Back	15.6	15.9	16.2	16.2	15.9	16.1	16.2
3	Fore	16.3	16.8	17.0	16.7	16.5	16.7	16.3
4	Back	16.7	17.0	17.2	17.0	16.7	16.9	16.6
4	Fore	17.8	17.3	17.6	17.4	17.0	17.0	16.8
5	Back	18.0	17.6	18.1	18.3	18.3	18.2	17.3
5	Fore	19.2	18.8	19.4	19.0	19.3	19.4	18.0
6	Back	19.2	18.8	19.4	19.0	19.3	19.4	18.0
6	Fore	18.4	17.8	18.3	18.0	17.6	17.9	17.1
7	Back	18.4	17.8	18.3	18.0	17.6	17.9	17.1
7	Fore	15.9	15.2	15.5	15.5	15.1	15.1	15.7
8	Back	15.5	14.9	15.2	15.2	14.9	14.9	15.4
8	Fore	14.6	14.4	14.6	14.6	14.4	14.5	14.8
9	Back	14.6	14.4	14.6	14.6	14.4	14.5	14.8
9	Fore	17.7	17.8	18.0	17.8	17.4	17.5	17.1
10	Back	17.7	17.8	18.0	17.8	17.4	17.5	17.1
10	Fore	20.3	20.1	20.7	20.5	20.0	20.0	19.2

Πίνακας 3.17 Αρχείο καταγραφής αισθητήρων επαναληπτικής εξωτερικής χωροστάθμησης



Διάγραμμα 3.8 Η θερμοβαθμίδα της εξωτερικής επαναληπτικής χωροστάθμησης

Τέλος τα δεδομένα πίεσης που λήφθηκαν από τον αισθητήρα χειρός κατά την διάρκεια των επαναληπτικών πειραμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.18.

Εσωτερική		Εξωτερική	
Ώρα	Πίεση (mbar)	Ώρα	Πίεση (mbar)
13:10	990.0	13:05	990.1
13:20	990.0	13:20	989.8
13:25	989.9	13:30	989.7
13:40	989.7	13:35	989.7
13:45	989.6	13:55	989.8
13:55	989.4	14:00	989.8
14:05	989.4	14:10	990.7
14:10	989.3	14:20	990.0
14:20	989.3	14:30	990.0
14:30	989.2	14:40	990.1
14:40	988.9		

Πίνακας 3.18 Ενδείξεις ατμοσφαιρικής πίεσης κατά την διάρκεια των πειραμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΒΑΘΜΙΔΑΣ

4.1 Μεθοδολογία

Όπως αναφέρθηκε, κατά την πρώτη σειρά πειραμάτων δεν τηρήθηκαν ορισμένες βασικές προϋποθέσεις, οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω. Η αρχική επεξεργασία έδειξε ότι δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα τους με σκοπό τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας και την αξιολόγηση των μοντέλων.

Τα επαναληπτικά πειράματα αντιθέτως, πραγματοποιήθηκαν με μεγάλη προσοχή καθώς τηρήθηκαν όλα τα βασικά σημεία που είχαν τονιστεί κατά την αξιολόγηση των πρώτων δεδομένων. Έτσι λοιπόν πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της θερμοβαθμίδας.

Για τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας με κάθε ένα από τα μοντέλα που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2 ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Σε κάθε σκόπευση να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα των αισθητήρων ώστε να υπολογιστούν οι συντελεστές κάθε μοντέλου και τα σφάλματά τους.

Έστω ότι η εξίσωση ενός μοντέλου είναι της μορφής:

$$t_i = f(z_i) \quad (4.1)$$

όπου t_i η θερμοκρασία που κατέγραψε ο αισθητήρας και z_i η απόσταση του αισθητήρα από το έδαφος.

Στα πειράματα προέκυψαν δεδομένα από 7 αισθητήρες. Έτσι λοιπόν δημιουργούνται δυο πίνακες 7×1 για κάθε σκόπευση:

$$T = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \\ z_7 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών κάθε μοντέλου είναι απαραίτητη η εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.

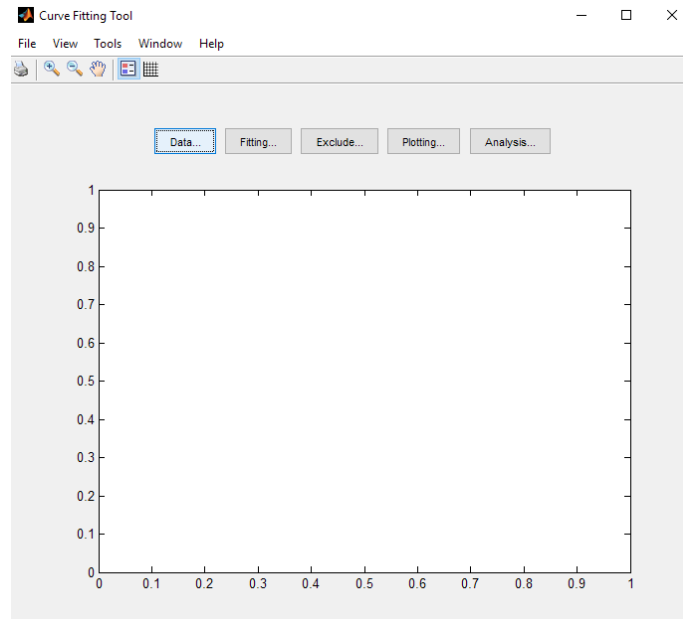
Αφού υπολογισθούν οι συντελεστές και τα σφάλματά τους πραγματοποιείται στατιστικός έλεγχος των αποτελεσμάτων.

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% είναι απαραίτητο να ισχύει η προϋπόθεση $\sigma_a * Z_{95} < a$. Ακόμη ο συντελεστής R^2 της κάθε προσαρμογής να είναι πολύ κοντά στο 1.

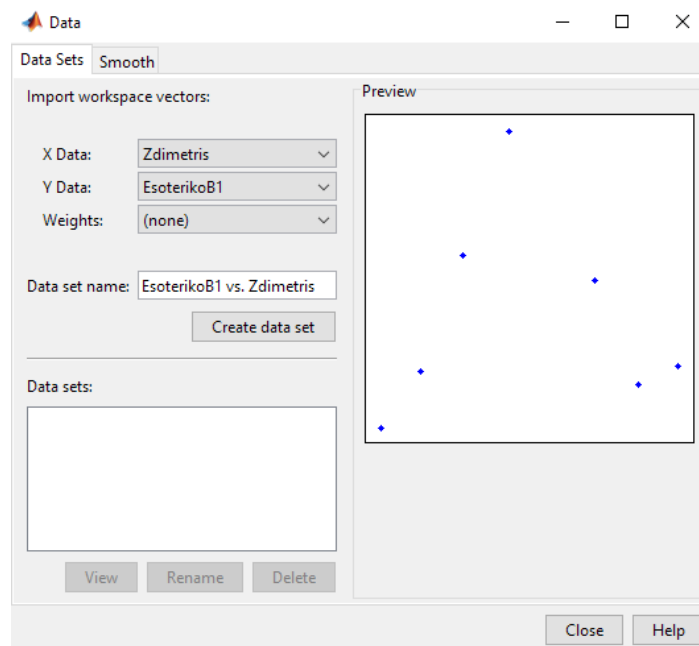
Λόγου του όγκου των δεδομένων αλλά και επειδή για να πραγματοποιηθεί η προσαρμογή σε κάθε στάση απαιτούνται πολλές επαναλήψεις, προτιμήθηκε οι υπολογισμοί να πραγματοποιηθούν στο λογισμικό Matlab και συγκεκριμένα το Curve Fitting Tool.

Στο συγκεκριμένο εργαλείο, δίνεται από τον χρήστη η εξίσωση του μοντέλου (4.1), στην οποία προσδιορίζονται οι μεταβλητές και οι συντελεστές, καθώς και τα σετ δεδομένων κάθε σκόπευσης (4.2). Υπολογίζονται σε πολύ γρήγορο χρόνο οι συντελεστές του κάθε μοντέλου, τα σφάλματά τους και άλλα στατιστικά στοιχεία της προσαρμογής του μοντέλου όπως το σ_0 και το R^2 .

Αρχικά λοιπόν εισάγονται τα δεδομένα μέσω της επιλογής Data. Στο παράθυρο που ανοίγει ζητούνται να δοθούν τα δεδομένα X και Y, όπου στην περίπτωση που μελετάται είναι τα $X=Z_i$ και $Y=T_i$ αντίστοιχα. Επιλέγεται λοιπόν ο πίνακας με τις θερμοκρασίες της μελετούμενης σκόπευσης ως Y δεδομένα και ο πίνακας με τις αποστάσεις των αισθητήρων ως X δεδομένα και έτσι δημιουργείται το σετ δεδομένων της σκόπευσης.



Εικόνα 4.1 Το εργαλείο Curve Fitting του Matlab

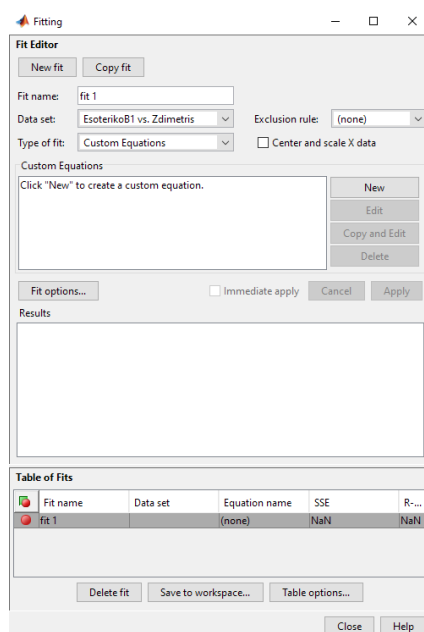


Εικόνα 4.2 Εισαγωγή δεδομένων στο Curve Fitting Tool

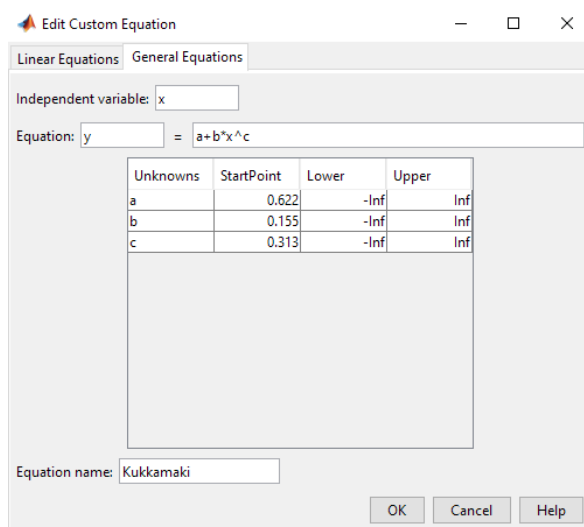
Στην εικόνα 4.2 φαίνεται η δημιουργία του σετ των δεδομένων της πρώτης σκόπευσης. Τα δεδομένα θεωρούνται ισοβαρή για αυτό δεν επιλέγονται βάρη και επιλέγεται το Create data set.

Αφού γίνει η εισαγωγή των δεδομένων για κάθε στάση και δημιουργηθούν όλα τα σετ θερμοκρασιών-υσομέτρων, γίνεται η προσαρμογή των δεδομένων στα μοντέλα με το Fitting.

Εκεί πληκτρολογείται από τον χρήστη η εξίσωση του μοντέλου (Type of fit: Custom Equations - New) (Εικόνα 4.3), επιλέγεται το σεντ δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί και γίνεται εφαρμογή του μοντέλου.



Εικόνα 4.3 Παράθυρο προσαρμογής στο Curve Fitting Tool



Εικόνα 4.4 Εισαγωγή Εξίσωσης για την προσαρμογή (Kukkamaki)

4.2 Προσαρμογή των μοντέλων

Οι συντελεστές των μοντέλων με τα σφάλματά τους όπως υπολογίσθηκαν με τη χρήση του Matlab παρουσιάζονται στους πίνακες 4.1 ως 4.14.

Μοντέλο Kukkamaki ($t = a + b * z^c$)

Σημειώνεται ότι τα σφάλματα που έχουν την ένδειξη του άπειρου ήταν της τάξεως του 10^6 ή και μεγαλύτερα γι' αυτό το λόγο δεν αναγράφονται οι ακριβείς τιμές τους. Η θερμοβαθμίδα της όπισθεν ένδειξης (B5) της πέμπτης στάσης, δεν προσαρμόζεται στο μοντέλο. Σε καμία περίπτωση δεν ικανοποιούνται οι στατιστικοί έλεγχοι.

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R²
B1	13.84	2160.80	5.49	2160.47	0.013	5.152	0.08
F1-B2	59.56	∞	-41.23	∞	-0.001	8.128	0.04
F2-B3	38.83	∞	-21.97	∞	-0.001	15.184	0.01
F3-B4	16.26	0.22	0.08	0.31	1.578	4.863	0.32
F4-B5	15.75	0.16	0.08	0.22	1.629	3.688	0.46
F5-B6	14.84	8.19	1.11	8.24	0.134	1.084	0.68
F6-B7	-27.04	∞	42.71	∞	0.003	1.641	0.47
F7-B8	-72.77	∞	88.55	∞	0.001	1.646	0.48
F8-B9	-44.22	∞	59.75	∞	0.001	2.595	0.27
F9-B10	15.73	0.49	-0.08	0.49	-0.756	2.376	0.44
F10	-71.75	∞	87.26	∞	0.001	1.693	0.46

Πίνακας 4.1 Προσαρμογή μοντέλου Kukkamaki στην εσωτερική χωροστάθμηση

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R²
B1	-11.09	∞	26.56	∞	0.0003	12.5508	0.01
F1	12.14	7.97	3.67	8.30	0.2647	0.6354	0.84
B2	3136.00	∞	-3121.00	∞	-0.0002	0.6389	0.82
F2	923.60	∞	-908.50	∞	-0.0004	0.5961	0.84
B3	-253.10	∞	269.10	∞	0.0006	1.0747	0.62
F3	-37.12	∞	53.74	∞	0.0005	11.0151	0.02
B4	-158.40	∞	175.30	∞	-0.0001	16.3062	0.01
F4	17.73	0.35	-0.29	0.42	1.0680	1.1077	0.81
B5							
F5-B6	-116.10	∞	135.10	∞	-0.0007	5.6840	0.06
F6-B7	18.09	0.22	-0.01	0.06	3.9020	4.9122	0.66
F7	383.20	∞	-367.80	∞	0.0004	2.3294	0.27
B8	193.20	∞	-178.10	∞	0.0004	3.4829	0.14
F8-B9	29.00	∞	-14.47	∞	-0.0017	6.9702	0.04
F9-B10	-1393.00	∞	1411.00	∞	-0.0001	1.7572	0.19
F10	-810.60	∞	830.70	∞	-0.0002	2.6542	0.22

Πίνακας 4.2 Προσαρμογή μοντέλου Kukkamaki στην εξωτερική χωροστάθμηση

Μοντέλο Hegershoff ($t = a + b * z^c$)

Παρατηρείται ότι οι συντελεστές των σκοπεύσεων του εσωτερικού πειράματος δεν περνούν τους στατιστικούς ελέγχους. Στο εξωτερικό πείραμα αντιθέτως, 4 από τα 16 συνολικά ζευγάρια συντελεστών περνούν και τους δυο στατιστικούς ελέγχους (Επισημαίνονται με γκρι σκίαση στον σχετικό πίνακα).

	a	σ_a	b	σ_b	R²
B1	19.240	0.149	0.042	0.069	0.07
F1-B2	18.225	0.153	0.059	0.071	0.12
F2-B3	16.785	0.134	0.045	0.062	0.10
F3-B4	16.274	0.084	0.059	0.039	0.32
F4-B5	15.758	0.061	0.058	0.028	0.46
F5-B6	15.808	0.083	0.067	0.038	0.38
F6-B7	15.562	0.092	0.044	0.043	0.38
F7-B8	15.695	0.098	0.034	0.045	0.10
F8-B9	15.470	0.104	0.021	0.048	0.04
F9-B10	15.556	0.122	0.025	0.057	0.04
F10	15.443	0.082	0.022	0.038	0.06

Πίνακας 4.3 Προσαρμογή μοντέλου Hegershoff στην εσωτερική χωροστάθμηση

	a	σ_a	b	σ_b	R²
B1	15.490	0.054	-0.007	0.011	0.07
F1	15.191	0.455	0.228	0.094	0.54
B2	14.949	0.299	0.193	0.062	0.66
F2	14.779	0.164	0.103	0.034	0.65
B3	15.879	0.118	0.031	0.024	0.65
F3	16.713	0.135	-0.027	0.028	0.16
B4	17.018	0.109	-0.036	0.023	0.33
F4	17.596	0.105	-0.094	0.022	0.79
B5	18.110	0.208	-0.032	0.043	0.10
F5-B6	19.247	0.259	-0.063	0.054	0.21
F6-B7	18.159	0.143	-0.089	0.030	0.64
F7	15.465	0.173	-0.013	0.036	0.02
B8	15.143	0.147	-0.001	0.031	0.00
F8-B9	14.476	0.079	0.016	0.016	0.17
F9-B10	17.859	0.081	-0.076	0.017	0.80
F10	20.486	0.158	-0.108	0.033	0.69

Πίνακας 4.4 Προσαρμογή μοντέλου Hegershoff στην εξωτερική χωροστάθμηση

Μοντέλο Reissmann 1 ($t = a + b * z + c * z^2$)

Το πρώτο μοντέλο του Reissman φαίνεται να προσαρμόζεται και στα δυο πειράματα σε λίγες μόνο περιπτώσεις, καθώς στο πρώτο μόνο πέντε και στο δεύτερο μόνο τρία σετ δεδομένων περνούν τους στατιστικούς ελέγχους.

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R2
B1	19.218	0.318	0.063	0.759	0.014	0.345	0.07
F1-B2	18.337	0.320	-0.317	0.764	0.199	0.347	0.16
F2-B3	16.910	0.275	-0.349	0.659	0.200	0.299	0.16
F3-B4	16.259	0.178	0.043	0.425	0.040	0.193	0.32
F4-B5	15.748	0.129	0.030	0.309	0.045	0.140	0.46
F5-B6	15.554	0.093	0.713	0.223	-0.248	0.101	0.83
F6-B7	15.297	0.120	0.745	0.286	-0.285	0.130	0.69
F7-B8	15.381	0.096	0.883	0.229	-0.356	0.104	0.81
F8-B9	15.207	0.158	0.741	0.378	-0.306	0.171	0.51
F9-B10	15.166	0.123	1.095	0.294	-0.459	0.133	0.78
F10	15.179	0.082	0.740	0.197	-0.305	0.089	0.79

Πίνακας 4.5 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 1 στην εσωτερική χωροστάθμηση

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R2
B1	15.429	0.102	0.118	0.165	-0.042	0.050	0.17
F1	13.827	0.410	2.644	0.660	-0.557	0.202	0.91
B2	14.094	0.316	1.659	0.509	-0.300	0.156	0.91
F2	14.360	0.215	0.811	0.347	-0.138	0.106	0.85
B3	15.643	0.191	0.459	0.308	-0.106	0.094	0.51
F3	16.405	0.200	0.598	0.323	-0.205	0.099	0.55
B4	16.797	0.176	0.430	0.283	-0.163	0.087	0.58
F4	17.718	0.199	-0.236	0.321	-0.024	0.098	0.81
B5	17.638	0.308	0.915	0.496	-0.304	0.152	0.51
F5-B6	18.846	0.462	0.778	0.746	-0.294	0.228	0.51
F6-B7	18.150	0.287	0.017	0.463	-0.094	0.142	0.64
F7	15.843	0.264	-0.733	0.426	0.205	0.130	0.44
B8	15.442	0.237	-0.579	0.382	0.171	0.117	0.37
F8-B9	14.551	0.152	-0.146	0.245	0.060	0.075	0.24
F9-B10	17.725	0.142	0.259	0.228	-0.153	0.070	0.85
F10	20.106	0.223	0.737	0.359	-0.327	0.110	0.85

Πίνακας 4.6 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 1 στην εξωτερική χωροστάθμηση

Μοντέλο Reissmann 2 ($t = a + b * z + c * z^2 + f * z^3$)

Το δεύτερο μοντέλο του Reissmann δεν προσαρμόζεται στα δύο πειράματα καθώς όλες οι σκοπεύσεις εκτός από δυο του εξωτερικού, δεν περνούν τους στατιστικούς ελέγχους.

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	f	σ_f	R2
B1	18.870	0.368	2.139	1.574	-2.506	1.754	0.800	0.549	0.46
F1-B2	18.115	0.441	1.015	1.888	-1.417	2.105	0.513	0.658	0.30
F2-B3	16.791	0.404	0.360	1.726	-0.661	1.924	0.273	0.602	0.21
F3-B4	16.178	0.259	0.528	1.110	-0.548	1.237	0.187	0.387	0.37
F4-B5	15.721	0.195	0.189	0.832	-0.149	0.928	0.061	0.290	0.47
F5-B6	15.604	0.134	0.411	0.571	0.118	0.637	-0.116	0.199	0.84
F6-B7	15.337	0.178	0.501	0.759	0.011	0.846	-0.094	0.265	0.71
F7-B8	15.408	0.143	0.720	0.612	-0.159	0.682	-0.063	0.213	0.82
F8-B9	15.145	0.233	1.113	0.995	-0.758	1.109	0.143	0.347	0.54
F9-B10	15.141	0.185	1.246	0.790	-0.643	0.881	0.058	0.275	0.79
F10	15.101	0.103	1.209	0.442	-0.875	0.493	0.181	0.154	0.86

Πίνακας 4.7 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 2 στην εσωτερική χωροστάθμηση

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	f	σ_f	R2
B1	15.286	0.047	0.749	0.136	-0.567	0.103	0.113	0.022	0.92
F1	13.824	0.587	2.656	1.717	-0.568	1.303	0.002	0.275	0.91
B2	14.024	0.448	1.964	1.310	-0.555	0.994	0.055	0.209	0.91
F2	14.148	0.229	1.749	0.669	-0.920	0.508	0.167	0.107	0.92
B3	15.389	0.119	1.578	0.347	-1.039	0.263	0.200	0.055	0.91
F3	16.251	0.245	1.275	0.716	-0.769	0.543	0.121	0.115	0.67
B4	16.642	0.202	1.115	0.590	-0.734	0.447	0.122	0.094	0.73
F4	17.761	0.282	-0.424	0.825	0.133	0.626	-0.034	0.132	0.82
B5	18.011	0.251	-0.733	0.733	1.068	0.556	-0.294	0.117	0.84
F5-B6	19.353	0.442	-1.463	1.293	1.573	0.981	-0.400	0.207	0.73
F6-B7	18.334	0.371	-0.795	1.085	0.583	0.823	-0.145	0.174	0.71
F7	15.726	0.361	-0.216	1.055	-0.225	0.801	0.092	0.169	0.49
B8	15.318	0.317	-0.031	0.927	-0.286	0.703	0.098	0.148	0.45
F8-B9	14.425	0.179	0.414	0.524	-0.407	0.398	0.100	0.084	0.48
F9-B10	17.651	0.190	0.588	0.555	-0.427	0.421	0.059	0.089	0.87
F10	20.210	0.303	0.276	0.885	0.057	0.671	-0.082	0.141	0.87

Πίνακας 4.8 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 2 στην εξωτερική χωροστάθμηση

Μοντέλο Reissmann 3 ($t = a + b * z + c * z^2 + f * z^3 + g * z^4$)

Το τρίτο μοντέλο του Reissmann προσαρμόζεται σχετικά καλά στις παρατηρήσεις του εσωτερικού πειράματος, καθώς έξι από τις 11 σκοπεύσεις περνούν τους στατιστικούς ελέγχους. Στο εξωτερικό πείραμα αντίθετα, μόνο τρεις σκοπεύσεις περνούν τους στατιστικούς ελέγχους. Παρόλα αυτά όλες οι σκοπεύσεις έχουν πολύ ικανοποιητικό R^2 .

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	f	σ_f	g	σ_g	R2
B1	19.312	0.431	-2.077	3.145	6.503	6.266	-5.740	4.444	1.518	1.026	0.74
F1-B2	18.771	0.334	-5.250	2.432	11.969	4.845	-9.204	3.436	2.256	0.793	0.86
F2-B3	17.434	0.194	-5.775	1.414	12.448	2.816	-9.243	1.997	2.209	0.461	0.94
F3-B4	16.607	0.039	-3.569	0.281	8.206	0.560	-6.168	0.397	1.475	0.092	1.00
F4-B5	16.039	0.057	-2.848	0.416	6.341	0.829	-4.649	0.588	1.094	0.136	0.98
F5-B6	15.822	0.046	-1.662	0.338	4.547	0.673	-3.331	0.477	0.746	0.110	0.99
F6-B7	15.608	0.119	-2.084	0.867	5.535	1.728	-4.104	1.225	0.931	0.283	0.99
F7-B8	15.589	0.157	-1.005	1.147	3.529	2.286	-2.740	1.621	0.621	0.374	0.92
F8-B9	15.493	0.171	-2.212	1.244	6.347	2.480	-5.014	1.758	1.197	0.406	0.91
F9-B10	15.406	0.159	-1.279	1.156	4.753	2.304	-3.859	1.634	0.909	0.377	0.95
F10	15.261	0.064	-0.317	0.466	2.386	0.928	-2.187	0.658	0.550	0.152	0.98

Πίνακας 4.9 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 3 στην εσωτερική χωροστάθμηση

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	f	σ_f	g	σ_g	R2
B1	15.318	0.063	0.509	0.329	-0.208	0.455	-0.065	0.219	0.028	0.034	0.98
F1	14.536	0.419	-2.740	2.189	7.506	3.031	-3.986	1.461	0.624	0.227	0.98
B2	14.581	0.288	-2.253	1.505	5.755	2.084	-3.063	1.005	0.487	0.156	0.98
F2	14.447	0.101	-0.520	0.525	2.475	0.727	-1.510	0.350	0.262	0.054	0.99
B3	15.385	0.185	1.608	0.965	-1.083	1.336	0.222	0.644	-0.003	0.100	0.91
F3	15.986	0.232	3.286	1.212	-3.778	1.677	1.607	0.809	-0.232	0.126	0.88
B4	16.449	0.224	2.574	1.172	-2.918	1.622	1.201	0.782	-0.169	0.122	0.86
F4	17.980	0.362	-2.082	1.891	2.613	2.617	-1.259	1.262	0.192	0.196	0.88
B5	18.121	0.370	-1.571	1.931	2.322	2.673	-0.914	1.289	0.097	0.200	0.86
F5-B6	19.115	0.634	0.341	3.308	-1.126	4.579	0.934	2.208	-0.208	0.343	0.77
F6-B7	18.352	0.578	-0.929	3.019	0.783	4.179	-0.244	2.015	0.015	0.313	0.71
F7	16.160	0.265	-3.506	1.385	4.696	1.917	-2.339	0.924	0.380	0.144	0.89
B8	15.696	0.241	-2.891	1.259	3.994	1.743	-2.016	0.840	0.331	0.131	0.87
F8-B9	14.652	0.102	-1.311	0.534	2.174	0.739	-1.175	0.356	0.199	0.055	0.93
F9-B10	17.553	0.274	1.332	1.429	-1.540	1.979	0.609	0.954	-0.086	0.148	0.89
F10	20.212	0.472	0.262	2.463	0.078	3.410	-0.093	1.644	0.002	0.256	0.86

Πίνακας 4.10 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 3 στην εξωτερική χωροστάθμηση

Μοντέλο Heer ($t = a + b * e^{c*z}$)

Το μοντέλο του Heer δεν προσαρμόζεται καθόλου καλά στις παρατηρήσεις των δυο πειραμάτων. Αρκετές παρατηρήσεις μάλιστα δεν επιλύονται καθόλου. Στο εξωτερικό πείραμα παρατηρείται πολλές φορές ικανοποιητικός συντελεστής προσδιορισμού (R^2) παρόλα αυτά τα σφάλματα των συντελεστών δεν περνούν τον στατιστικό έλεγχο.

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R2
B1	19.4	0.3	-0.295	0.8	-3.151	17.0	0.1
F1-B2	54.4	∞	-36.150	∞	-0.003	9.4	0.1
F2-B3	36.0	∞	-19.170	∞	-0.004	11.6	0.1
F3-B4	29.0	∞	-12.750	∞	-0.010	4.3	0.3
F4-B5	15.8	0.1	0.000	0.0	4.123	7.9	0.5
F5-B6	16.1	0.2	-0.5	0.2	-1.703	2.1	0.7
F6-B7	15.7	0.1	-0.428	0.3	-2.201	3.7	0.5
F7-B8	15.8	0.1	-0.484	0.4	-3.0	4.4	0.6
F8-B9	15.6	0.1	-0.401	0.5	-3.257	7.5	0.4
F9-B10	15.7	0.1	-0.577	0.5	-3.550	6.1	0.5
F10	15.5	0.1	-0.464	0.4	-4.033	5.4	0.6

Πίνακας 4.11 Προσαρμογή μοντέλου Heer στην εσωτερική χωροστάθμηση

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R2
B1	15.5	0.4	-0.010	0.3	0.6	9.3	0.0
F1	17.1	0.8	-3.4	0.9	-1.029	0.8	0.9
B2	16.7	0.8	-2.666	0.7	-0.8	0.7	0.9
F2	15.6	0.4	-1.379	0.4	-0.940	0.8	0.9
B3	-88.8	∞	104.600	∞	0.001	2.6	0.4
F3							
B4	-103.0	$\infty\infty$	120.100		-0.001	3.8	0.7
F4	19.1	9.9	-1.406	9.7	0.169	0.9	0.8
B5							
F5-B6							
F6-B7	18.1	0.3	-0.014	0.1	1.358	1.9	0.7
F7	186.0	∞	-170.500	∞	0.000	10.4	0.1
B8	51.6	$\infty\infty$	-36.450	∞	0.001	12.3	0.0
F8-B9	36.0	∞	-21.6	∞	-0.002	5.2	0.1
F9-B10	17.9	0.3	-0.029	0.1	1.074	1.2	0.8
F10	-795.1	∞	815.400	∞	0.000	5.2	0.3

Πίνακας 4.12 Προσαρμογή μοντέλου Heer στην εξωτερική χωροστάθμηση

Μοντέλο Kharagani ($t = a * z + b * z^c$)

Το μοντέλο του Kharagani, με εξαίρεση δυο σκοπεύσεις του εξωτερικού πειράματος δεν προσαρμόζεται καλά και στα δύο πειράματα. Ακόμη και αν σε πολλές περιπτώσεις ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) είναι πολύ κοντά στην μονάδα, τα σφάλματα των συντελεστών δεν περνούν τον στατιστικό έλεγχο για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R²
B1	-0.010	0.636	19.340	0.806	0.004	0.023	0.085
F1-B2	0.314	0.635	17.940	0.811	-0.008	0.024	0.139
F2-B3	0.338	0.532	16.440	0.679	-0.012	0.022	0.173
F3-B4	0.206	0.350	16.130	0.449	-0.004	0.015	0.329
F4-B5	0.224	0.248	15.590	0.316	-0.005	0.011	0.491
F5-B6	-0.019	0.259	15.980	0.327	0.009	0.011	0.677
F6-B7	-0.108	0.314	15.800	0.398	0.011	0.014	0.500
F7-B8	-0.233	0.285	16.070	0.362	0.016	0.012	0.608
F8-B9	-0.233	0.363	15.820	0.459	0.015	0.016	0.394
F9-B10	-0.369	0.355	16.090	0.449	0.022	0.015	0.593
F10	-0.270	0.197	15.840	0.250	0.017	0.009	0.724

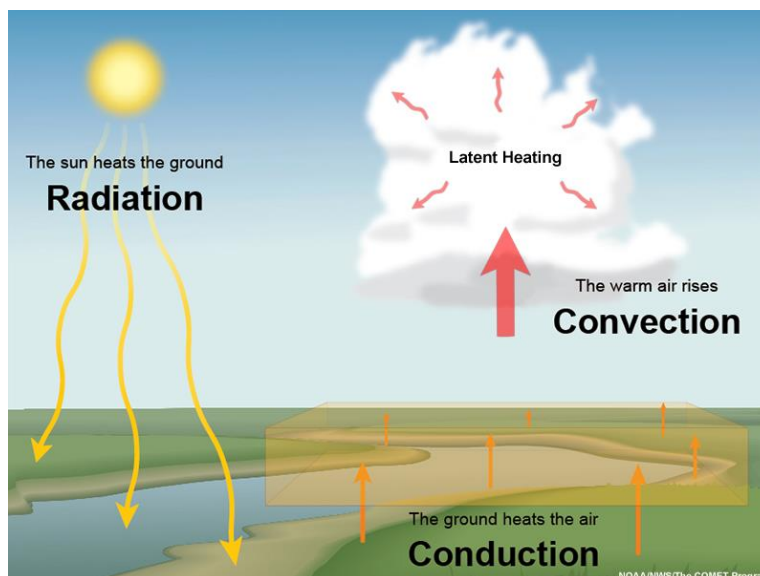
Πίνακας 4.13 Προσαρμογή μοντέλου Kharagani στην εσωτερική χωροστάθμηση

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R²
B1	-0.134	0.108	15.670	0.168	0.008	0.006	0.449
F1	0.142	0.796	15.720	1.209	0.049	0.047	0.827
B2	0.330	0.509	15.090	0.791	0.026	0.031	0.866
F2	0.123	0.276	14.940	0.429	0.017	0.017	0.858
B3	-0.144	0.196	16.200	0.306	0.017	0.011	0.702
F3	-0.467	0.202	17.320	0.316	0.025	0.011	0.743
B4	-0.428	0.175	17.540	0.276	0.020	0.009	0.760
F4	-0.264	0.250	17.680	0.398	-0.003	0.013	0.815
B5	-0.285	0.539	18.430	0.847	0.013	0.027	0.125
F5-B6	-0.353	0.697	19.570	1.092	0.010	0.033	0.166
F6-B7	-0.291	0.384	18.300	0.607	0.001	0.020	0.606
F7	0.249	0.320	15.040	0.515	-0.022	0.020	0.438
B8	0.233	0.294	14.780	0.474	-0.019	0.019	0.343
F8-B9	0.119	0.197	14.350	0.311	-0.005	0.013	0.186
F9-B10	-0.487	0.182	18.340	0.286	0.015	0.009	0.856
F10	-0.714	0.421	21.200	0.653	0.020	0.019	0.690

Πίνακας 4.14 Προσαρμογή μοντέλου Kharagani στην εξωτερική χωροστάθμηση

4.3 Προσαρμογή με αφαίρεση αισθητήρων

Είναι γνωστό ότι η θερμοκρασία του εδάφους μεταβάλλεται με διαφορετικό ρυθμό από ότι η θερμοκρασία του αέρα (Εικόνα 4.. Είναι πιθανό λοιπόν, η κατά λίγο διαφορετική θερμοκρασία εδάφους να επηρεάζει τις μετρήσεις των αισθητήρων που βρίσκονται στην χαμηλή θέση της σταδίας.



Εικόνα 4.5 Θέρμανση Εδάφους και Ατμόσφαιρας (The University Corporation for Atmospheric Research)

Το γεγονός αυτό ενδεχομένως επηρεάζει τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας και για τον λόγο αυτό τα μοντέλα δεν προσαρμόζονται ικανοποιητικά στα δεδομένα θερμοκρασίας που καταγράφηκαν από το σύνολο των αισθητήρων και δεν περνούν τους απαραίτητους στατιστικούς ελέγχους.

Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν οι ίδιοι υπολογισμοί, χωρίς να ληφθούν υπόψιν οι δυο πρώτοι αισθητήρες που τοποθετήθηκαν στο κάτω μέρος της σταδίας στα ύψη 0.010, 0.262 στην δίμετρη και 0.105, 0.402 στην τρίμετρη σταδία κατά την εσωτερική και την εξωτερική χωροστάθμηση αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσαρμογή κάθε μοντέλου στις παρατηρήσεις των υπολοίπων 5 αισθητήρων παρουσιάζονται στους πίνακες 4.15 ως 4.26 (με γκρι σκίαση επισημαίνονται οι σκοπεύσεις που περνούν τους στατιστικούς ελέγχους).

*Μοντέλο Kukkamaki ($t = a + b * z^c$)*

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R2
B1	86.84	∞	-67.47	∞	4.0E-04	178.01	0.002
F1-B2	45.46	∞	-27.14	∞	-5.1E-03	47.28	0.05
F2-B3	16.90	0.42	-1E-06	0.14	-25.80	13.16	0.19
F3-B4	16.44	0.25	-8E-05	0.08	-25.92	13.22	0.23
F4-B5	15.93	0.16	-4E-06	0.07	-22.24	11.35	0.38
F5-B6							
F6-B7							
F7-B8							
F8-B9							
F9-B10	-900.70	∞	916.40	∞	-9.2E-05	6.06	0.07
F10	-8.21	∞	23.77	∞	-3.8E-03	20.10	0.21

Πίνακας 4.15 Προσαρμογή μοντέλου Kukkamaki στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R2
B1	300.70	∞	-285.20	∞	3.1E-04	9.11	0.39
F1	-1049.00	∞	1065.00	∞	7.9E-04	8.15	0.50
B2	-411.50	∞	427.10	∞	1.7E-03	6.67	0.71
F2	46.79	∞	-31.63	∞	-1.1E-02	10.70	0.49
B3	152.90	∞	-136.80	∞	2.1E-04	30.52	0.03
F3	50.25	∞	-33.34	∞	1.3E-02	6.73	0.71
B4	63.01	∞	-45.83	∞	9.9E-03	5.20	0.80
F4	18.89	5.52	-1.30	5.47	0.4326	1.45	0.98
B5	-395.30	∞	413.60	∞	-7.5E-04	23.67	0.22
F5-B6	-479.80	∞	499.20	∞	-1.2E-03	17.91	0.25
F6-B7	-293.50	∞	311.70	∞	-2.3E-03	6.49	0.72
F7	15.16	0.42	3.76E-11	1.01E-08	20.8900	240.92	0.13
B8	14.89	0.39	1.3E-11	3.6E-09	21.8800	250.83	0.09
F8-B9	14.55	0.18	8.6E-09	-1.9E-09	21.4800	253.79	0.58
F9-B10	18.78	6.51	-0.83	6.40	0.5923	3.37	0.91
F10	-1142.00	∞	1163.00	∞	-8.5E-04	5.69	0.80

Πίνακας 4.16 Προσαρμογή μοντέλου Kukkamaki στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

*Μοντέλο Hegershoff ($t = a + b * z^c$)*

	a	σ_a	b	σ_b	R2
B1	19.337	0.346	0.011	0.135	0.003015
F1-B2	18.233	0.351	0.057	0.137	0.07936
F2-B3	16.770	0.291	0.051	0.114	0.09002
F3-B4	16.339	0.171	0.038	0.067	0.1385
F4-B5	15.811	0.109	0.041	0.043	0.3197
F5-B6	15.970	0.125	0.014	0.049	0.04031
F6-B7	15.732	0.152	-0.011	0.059	0.01736
F7-B8	15.875	0.155	-0.025	0.061	0.07622
F8-B9	15.645	0.186	-0.035	0.073	0.1051
F9-B10	15.802	0.172	-0.055	0.067	0.2523
F10	15.622	0.090	-0.037	0.035	0.3545

Πίνακας 4.17 Προσαρμογή μοντέλου Hegershoff στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

	a	σ_a	b	σ_b	R2
B1	15.560	0.098	-0.017	0.017	0.3268
F1	16.218	0.475	0.080	0.083	0.3155
B2	15.618	0.328	0.096	0.057	0.5849
F2	15.133	0.191	0.051	0.033	0.541
B3	16.092	0.155	0.000	0.027	0.0001133
F3	16.932	0.171	-0.059	0.030	0.6614
B4	17.191	0.153	-0.061	0.027	0.7226
F4	17.627	0.106	-0.098	0.019	0.9331
B5	18.447	0.343	-0.081	0.060	0.4765
F5-B6	19.536	0.522	-0.104	0.091	0.3937
F6-B7	18.263	0.233	-0.104	0.041	0.7633
F7	15.370	0.285	0.002	0.050	0.0005675
B8	15.086	0.257	0.008	0.045	0.01489
F8-B9	14.504	0.167	0.013	0.029	0.0851
F9-B10	17.994	0.141	-0.095	0.025	0.881
F10	20.817	0.196	-0.156	0.034	0.9122

Πίνακας 4.18 Προσαρμογή μοντέλου Hegershoff στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

*Μοντέλο Reissmann 1 ($t = a + b * z + c * z^2$)*

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R2
B1	20.30	1.38	-1.6923	2.37	0.6409	0.89	0.2059
F1-B2	18.92	1.49	-1.1997	2.55	0.5039	0.96	0.171
F2-B3	17.15	1.27	-0.6731	2.18	0.3014	0.82	0.1314
F3-B4	16.55	0.75	-0.3747	1.29	0.1776	0.48	0.1735
F4-B5	15.91	0.48	-0.1785	0.82	0.1077	0.31	0.3353
F5-B6	15.35	0.33	1.0918	0.57	-0.3925	0.21	0.6636
F6-B7	15.10	0.50	1.1192	0.86	-0.4281	0.32	0.4705
F7-B8	15.13	0.43	1.3063	0.74	-0.5112	0.28	0.6363
F8-B9	15.21	0.77	0.7548	1.33	-0.3165	0.50	0.23
F9-B10	15.11	0.59	1.2183	1.00	-0.5092	0.38	0.5701
F10	15.41	0.37	0.3759	0.64	-0.1770	0.24	0.5701

Πίνακας 4.19 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 1 στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R2
B1	16.04	0.25	-0.5711	0.29	0.1252	0.07	0.7724
F1	14.19	1.48	2.3958	1.70	-0.5165	0.43	0.6558
B2	14.59	1.24	1.2121	1.42	-0.2054	0.36	0.6958
F2	15.32	0.83	-0.2211	0.95	0.1064	0.24	0.5531
B3	16.83	0.42	-0.8651	0.49	0.2149	0.12	0.6123
F3	17.25	0.72	-0.3711	0.82	0.0332	0.21	0.6123
B4	17.64	0.59	-0.5346	0.67	0.0720	0.17	0.7888
F4	18.17	0.25	-0.6440	0.28	0.0622	0.07	0.9812
B5	16.63	0.73	2.1469	0.84	-0.6152	0.21	0.9812
F5-B6	17.76	1.90	2.0937	2.18	-0.6251	0.55	0.5845
F6-B7	18.27	1.03	-0.0135	1.18	-0.1002	0.30	0.7633
F7	16.87	0.62	-1.7745	0.71	0.4433	0.18	0.7562
B8	16.45	0.54	-1.6124	0.63	0.4091	0.16	0.7721
F8-B9	15.27	0.48	-0.9031	0.55	0.2373	0.14	0.611
F9-B10	18.38	0.56	-0.4548	0.64	0.0181	0.16	0.9051
F10	20.40	0.81	0.4859	0.93	-0.2771	0.23	0.9227

Πίνακας 4.20 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 1 στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

Μοντέλο Reissmann 2 ($t = a + b * z + c * z^2 + f * z^3$)

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	f	σ_f	R2
B1	14.98	2.78	12.55	7.23	-10.76	5.69	2.82	1.40	0.8429
F1-B2	12.61	1.17	15.68	3.04	-13.01	2.40	3.34	0.59	0.975
F2-B3	11.70	0.36	13.94	0.94	-11.40	0.74	2.89	0.18	0.9965
F3-B4	13.37	0.57	8.15	1.48	-6.65	1.17	1.68	0.29	0.9767
F4-B5	13.85	0.15	5.34	0.39	-4.31	0.31	1.09	0.08	0.9968
F5-B6	14.02	0.54	4.65	1.40	-3.24	1.10	0.70	0.27	0.9567
F6-B7	13.39	1.37	5.69	3.57	-4.08	2.81	0.90	0.69	0.8049
F7-B8	13.66	1.21	5.25	3.15	-3.67	2.48	0.78	0.61	0.8622
F8-B9	11.92	0.46	9.58	1.20	-7.38	0.94	1.74	0.23	0.9867
F9-B10	12.62	0.36	7.89	0.92	-5.85	0.73	1.32	0.18	0.9922
F10	13.81	0.13	4.64	0.34	-3.59	0.27	0.84	0.07	0.9967

Πίνακας 4.21 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 2 στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	f	σ_f	R2
B1	15.078	0.548	1.160	0.955	-0.798	0.501	0.152	0.082	0.9486
F1	8.128	2.426	13.252	4.224	-6.309	2.217	0.952	0.363	0.9564
B2	9.387	1.523	10.536	2.651	-5.180	1.392	0.817	0.228	0.9781
F2	11.700	0.252	6.267	0.439	-3.355	0.230	0.569	0.038	0.9981
B3	15.898	1.686	0.796	2.935	-0.672	1.541	0.146	0.252	0.7094
F3	19.461	2.338	-4.340	4.070	2.151	2.136	-0.348	0.349	0.8456
B4	19.171	2.171	-3.271	3.779	1.532	1.984	-0.240	0.324	0.8635
F4	18.348	1.124	-0.958	1.958	0.230	1.028	-0.028	0.168	0.9817
B5	18.771	2.479	-1.695	4.316	1.435	2.265	-0.337	0.370	0.9331
F5-B6	25.5	3.1	-11.9	5.3	6.8	2.8	-1.2	0.5	0.9493
F6-B7	21.6	3.1	-6.0	5.5	3.1	2.9	-0.526	0.5	0.895
F7	14.177	0.293	3.059	0.511	-2.136	0.268	0.424	0.044	0.9974
B8	14.100	0.368	2.606	0.641	-1.841	0.337	0.370	0.055	0.9951
F8-B9	13.180	0.042	2.841	0.074	-1.760	0.039	0.328	0.006	0.9999
F9-B10	19.902	1.985	-3.183	3.457	1.474	1.815	-0.239	0.297	0.9425
F10	23.105	2.401	-4.353	4.181	2.305	2.195	-0.424	0.359	0.9678

Πίνακας 4.22 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 2 στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

Μοντέλο Reissmann 3 ($t = a + b * z + c * z^2 + f * z^3 + g * z^4$)

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	f	σ_f	g	σ_g	R2
B1	18.809	3.148	0.271	15.064	2.977	23.345	-3.652	14.241	1.094	2.973	0.7337
F1-B2	19.173	2.432	-7.123	11.638	14.783	18.036	-10.871	11.002	2.595	2.297	0.8645
F2-B3	18.253	1.166	-9.593	5.580	18.182	8.647	-12.639	5.275	2.899	1.101	0.9565
F3-B4	16.691	0.272	-3.963	1.301	8.796	2.016	-6.518	1.230	1.546	0.257	0.9955
F4-B5	15.748	0.301	-1.492	1.439	4.304	2.230	-3.443	1.361	0.848	0.284	0.9918
F5-B6	16.156	0.034	-3.221	0.164	6.889	0.254	-4.718	0.155	1.028	0.032	0.9999
F6-B7	16.337	0.472	-5.482	2.257	10.638	3.497	-7.127	2.133	1.545	0.445	0.9826
F7-B8	16.687	0.321	-6.126	1.536	11.219	2.380	-7.295	1.452	1.547	0.303	0.9903
F8-B9	16.552	0.656	-7.148	3.140	13.760	4.866	-9.405	2.969	2.090	0.620	0.9698
F9-B10	15.944	1.037	-3.789	4.961	8.522	7.688	-6.091	4.690	1.363	0.979	0.9342
F10	15.376	0.457	-0.856	2.188	3.195	3.391	-2.666	2.069	0.647	0.432	0.9651

Πίνακας 4.23 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 3 στην εσωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	f	σ_f	g	σ_g	R2
B1	15.005	0.381	1.521	1.264	-1.248	1.340	0.352	0.553	-0.029	0.078	0.9547
F1	12.725	2.748	3.116	9.111	1.492	9.658	-1.573	3.990	0.293	0.561	0.9782
B2	13.495	1.988	1.260	6.593	2.147	6.988	-1.615	2.887	0.289	0.406	0.9814
F2	14.069	0.693	0.704	2.299	1.217	2.437	-1.005	1.007	0.193	0.141	0.991
B3	14.227	0.860	5.352	2.851	-4.928	3.022	1.765	1.248	-0.215	0.175	0.909
F3	14.276	0.574	8.815	1.903	-9.457	2.017	3.886	0.833	-0.544	0.117	0.9836
B4	14.823	0.633	7.832	2.100	-8.318	2.226	3.368	0.920	-0.465	0.129	0.98
F4	15.172	0.129	6.995	0.428	-6.710	0.453	2.482	0.187	-0.320	0.026	0.9996
B5	15.455	1.079	7.050	3.578	-6.532	3.793	2.639	1.567	-0.389	0.220	0.9808
F5-B6	14.204	0.237	16.220	0.785	-17.434	0.833	7.477	0.344	-1.104	0.048	0.9995
F6-B7	13.905	0.608	13.450	2.017	-13.985	2.137	5.681	0.883	-0.796	0.124	0.9928
F7	14.114	0.226	3.111	0.750	-2.099	0.795	0.388	0.328	0.007	0.046	0.9975
B8	13.851	0.320	3.074	1.062	-2.132	1.126	0.442	0.465	-0.006	0.065	0.9944
F8-B9	13.879	0.181	1.189	0.602	-0.393	0.638	-0.145	0.263	0.058	0.037	0.9965
F9-B10	15.482	0.484	8.026	1.605	-8.415	1.702	3.367	0.703	-0.464	0.099	0.9942
F10	16.565	0.328	12.053	1.087	-12.032	1.152	4.766	0.476	-0.664	0.067	0.9989

Πίνακας 4.24 Προσαρμογή μοντέλου Reissmann 3 στην εξωτερική χωροστάθμηση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

Μοντέλο Heer ($t = a + b * e^{c*z}$)

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R2
B1	19.4	0.5	-32.820		-15.620		0.0
F1-B2	99.3		-81.0		0.000	123.2	0.0
F2-B3							
F3-B4	26.7		-10.410		-0.008	25.5	0.1
F4-B5	22.0	4937.2	-6.277	4936.4	-0.017	13.6	0.3
F5-B6	5.1		10.8		0.005	27.5	0.1
F6-B7							
F7-B8							
F8-B9	5.3		10.360		-0.008	30.8	0.1
F9-B10	-11.8		27.590		-0.004	19.0	0.2
F10	15.6	0.6	-0.010	0.3	1.357	12.0	0.4

Πίνακας 4.25 Προσαρμογή μοντέλου Heer στην εσωτερική χωροστάθμιση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

	a	σ_a	b	σ_b	c	σ_c	R2
B1	39.9		-24.290		0.0	3.3	0.4
F1	-685.6		700.8		0.001	2.4	0.1
B2	-299.7		314.700		0.0	1.8	0.6
F2	87.2		-72.210		-0.003	2.8	0.5
B3	19.9		-3.813		0.004	25.5	0.0
F3	47.6		-30.500		0.008	1.9	0.7
B4	66.7		-49.300		0.005	1.6	0.8
F4	71.3		-53.310		0.007	0.5	1.0
B5							
F5-B6							
F6-B7	18.2	1.1	-0.033	0.3	1.117	1.1	0.8
F7							
B8							
F8-B9							
F9-B10	0.8	3841.9	-27.430	3818.1	0.014	0.9	0.9
F10	20.7	0.7	-0.034	0.2	1.230	0.2	0.9

Πίνακας 4.26 Προσαρμογή μοντέλου Heer στην εξωτερική χωροστάθμιση μετά από αφαίρεση αισθητήρων

Μοντέλο Kharagani ($t = a * z + b * z^c$)

Το μοντέλο Kharagani, με την αφαίρεση των δυο αισθητήρων δεν προσαρμόστηκε σε καμία από τις σκοπεύσεις και των δυο πειραμάτων.

4.4 Σχολιασμός Προσαρμογών

Παρατηρώντας τα δεδομένα των προσαρμογών με μια πρώτη ανάγνωση, είναι ξεκάθαρο πως κανένα μοντέλο δεν προσαρμόζεται πλήρως στα δεδομένα θερμοκρασίας που καταγράφηκαν σε κανένα από τα πραγματοποιηθέντα πειράματα.

Στην πρώτη προσαρμογή, στην οποία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα όλων των αισθητήρων, παρατηρείται πως η προσαρμογή κάθε ενός από τα μοντέλα, δεν περνά και τους δυο στατιστικούς ελέγχους σε περισσότερες από το 50% των σκοπεύσεων. Η μόνη περίπτωση για την οποία δεν ισχύει αυτό είναι η προσαρμογή του μοντέλου Reissmann 3 στο εσωτερικό πείραμα, στο οποίο οι 12 από τις 20 σκοπεύσεις περνούν τους στατιστικούς ελέγχους.

Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, το ποσοστό των σκοπεύσεων που περνά τους στατιστικούς ελέγχους είναι αρκετά μικρό για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο στον υπολογισμό των διορθώσεων των ενδείξεων της σταδίας και κατ' επέκταση του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης.

Αξίζει να σημειωθεί πως στα μοντέλα που έχουν εκθετική μορφή (Kukkammaki, Heer και Kharaghani), καμία από τις στάσεις δεν περνά τους στατιστικούς ελέγχους, ενώ αρκετές φορές δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί καθόλου η προσαρμογή.

Στην δεύτερη προσαρμογή, μετά την αφαίρεση των δεδομένων των δυο χαμηλότερων αισθητήρων, η προσαρμογή των γραμμικών μοντέλων που πρότεινε ο Reissmann και στα δυο πειράματα περνά τους στατιστικούς ελέγχους στις περισσότερες σκοπεύσεις. Η καλύτερη προσαρμογή είναι εκείνη του μοντέλου Reissmann 2 στο εσωτερικό πείραμα περνά τους στατιστικούς ελέγχους στις 15 από τις 20 σκοπεύσεις.

Στην νέα προσαρμογή κάθε ενός από τα μοντέλα στο εξωτερικό πείραμα, οι στατιστικοί έλεγχοι δεν ικανοποιούνται σε περισσότερες από το 50% των σκοπεύσεων.

Και στην δεύτερη προσαρμογή τα εκθετικά μοντέλα δεν περνούν και τους δύο στατιστικούς ελέγχους ενώ σε αρκετά από αυτά δεν πραγματοποιείται καθόλου η προσαρμογή.

Αξίζει να τονιστεί επίσης το γεγονός ότι στα γραμμικά μοντέλα του Reissmann στο σύνολό τους, ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι πολύ κοντά στο 1, γεγονός που δηλώνει το ότι η προσαρμογή του μοντέλου είναι αρκετά καλή.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των προσαρμογών των μοντέλων στις δυο χωροσταθμίσεις παρουσιάζονται στους πίνακες 4.27 ως 4.30. Θεωρήθηκε σκόπιμο τα εκθετικά μοντέλα να μην συμπεριληφθούν λόγω του ότι κανένα από αυτά δεν ικανοποιούσε τους απαραίτητους στατιστικούς ελέγχους.

	Hugershoff	Reissmann1	Reissmann2	Reissmann3
B1				
F1-B2				√
F2-B3				√
F3-B4				√
F4-B5				√
F5-B6		√		√
F6-B7		√		√
F7-B8		√		
F8-B9				
F9-B10		√		
F10		√		

Πίνακας 4.27 Πρώτη προσαρμογή μοντέλων στην εσωτερική χωροστάθμιση

	Hugershoff	Reissmann1	Reissmann2	Reissmann3
B1			√	
F1				
B2	√			
F2	√			
B3			√	
F3				
B4				
F4	√			
B5				
F5-B6				
F6-B7	√			
F7				√
B8				√
F8-B9				√
F9-B10	√			
F10	√			

Πίνακας 4.28 Πρώτη προσαρμογή μοντέλων στην εξωτερική χωροστάθμιση

	Hugershoff	Reissmann1	Reissmann2	Reissmann3
B1				
F1-B2			✓	
F2-B3			✓	
F3-B4			✓	✓
F4-B5			✓	
F5-B6			✓	✓
F6-B7				✓
F7-B8				✓
F8-B9			✓	✓
F9-B10			✓	
F10			✓	

Πίνακας 4.29 Δεύτερη προσαρμογή μοντέλων στην εσωτερική χωροστάθμηση

	Hugershoff	Reissmann1	Reissmann2	Reissmann3
B1				
F1			✓	
B2			✓	
F2			✓	
B3				
F3				✓
B4	✓			✓
F4	✓			✓
B5		✓		
F5-B6			✓	✓
F6-B7	✓			✓
F7		✓	✓	
B8		✓	✓	
F8-B9			✓	
F9-B10	✓			✓
F10	✓			✓

Πίνακας 4.30 Δεύτερη προσαρμογή μοντέλων στην εξωτερική χωροστάθμηση

4.5 Διόρθωση λόγω διάθλασης

Πριν τον υπολογισμό της διόρθωσης λόγω διάθλασης είναι απαραίτητη και η διόρθωση των αναγνώσεων της σταδίας λόγω καμπυλότητας της Γης. Η σχέση υπολογισμού της διόρθωσης αυτής είναι:

$$C_c = \frac{S^2}{2R} \quad (4.1)$$

Όπου S η οριζόντια απόσταση μεταξύ χωροβάτη και σταδίας και R η ακτίνα καμπυλότητας της Γης στην συγκεκριμένη περιοχή.

Η ακτίνα της Γης μεταβάλλεται με τη μεταβολή του γεωγραφικού μήκους. Στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης του Ζωγράφου η ακτίνα καμπυλότητας της Γης, όπως υπολογίσθηκε από την ηλεκτρονική εφαρμογή Earth Radius by Latitude Calculator, είναι 6370277m. [<https://rechneronline.de/earth-radius>].

PointID	MeasType	StaffReading	Distance	C_c	CorrReading
1	Back	1.502457	17.423720	2.4E-05	1.502481
1	Fore	1.505600	28.768525	6.5E-05	1.505665
2	Back	1.506897	28.142090	6.2E-05	1.506959
2	Fore	1.505208	13.937550	1.5E-05	1.505223
3	Back	1.504358	13.261924	1.4E-05	1.504372
3	Fore	1.514997	31.687055	7.9E-05	1.515076
4	Back	1.513718	27.874636	6.1E-05	1.513779
4	Fore	1.500293	18.124480	2.6E-05	1.500318
5	Back	1.500860	16.321885	2.1E-05	1.500881
5	Fore	1.521128	34.717948	9.5E-05	1.521222
6	Back	1.520128	33.557005	8.8E-05	1.520217
6	Fore	1.496198	8.024691	5.1E-06	1.496203
7	Back	1.495053	9.401807	6.9E-06	1.495060
7	Fore	1.512042	27.035502	5.7E-05	1.512099
8	Back	1.513391	27.771711	6.1E-05	1.513451
8	Fore	1.502498	17.316852	2.4E-05	1.502522
9	Back	1.500181	18.618211	2.7E-05	1.500208
9	Fore	1.504793	23.164763	4.2E-05	1.504835
10	Back	1.507053	25.558413	5.1E-05	1.507104
10	Fore	1.500985	20.139752	3.2E-05	1.501017

Πίνακας 4.31 Διόρθωση τιμών λόγω καμπυλότητας

Είναι γεγονός ότι ορισμένες σκοπεύσεις δεν περνούν και τους δυο στατιστικούς ελέγχους σε κανένα μοντέλο. Παρόλα αυτά όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο συντελεστής προσδιορισμού των μοντέλων αυτών είναι πολύ κοντά στο 1. Έτσι λοιπόν γίνεται η παραδοχή πως ακόμη

και αν δεν περνούν τον δεύτερο στατιστικό έλεγχο, μπορούν να διορθωθούν με την χρήση αυτών των μοντέλων.

Έτσι λοιπόν η εσωτερική χωροστάθμηση θα διορθωθεί εξ ολοκλήρου με τη χρήση του μοντέλου Reissmann 2.

Η εξωτερική χωροστάθμηση δεν μπορεί να διορθωθεί γιατί ακόμη και με τη χρήση συνδυασμού μοντέλων, δεν περνούν όλες οι σκοπεύσεις τους στατιστικούς ελέγχους.

Η διόρθωση υπολογίζεται με τις σχέσεις 2.8 και 2.9 που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.3.

Το d κάθε σκόπευσης υπολογίστηκε από την πίεση που κατέγραψε ο μετεωρολογικός σταθμός χειρός και από τον μέσο όρο της θερμοκρασίας που κατέγραψαν οι αισθητήρες την στιγμή της σκόπευσης: $d = -10^{-6} * (0.933 - 0.0064 * (T - 20)) * P/1013$.

	P (mbar)	T (°C)	d (mbar/°C)
B1	990	19.31	-9.2E-07
F1	990	18.32	-9.2E-07
B2	990	18.32	-9.2E-07
F2	990	16.86	-9.3E-07
B3	990	16.86	-9.3E-07
F3	989.8	16.37	-9.3E-07
B4	989.8	16.37	-9.3E-07
F4	989.7	15.85	-9.4E-07
B5	989.7	15.85	-9.4E-07
F5	989.5	15.91	-9.4E-07
B6	989.5	15.91	-9.4E-07
F6	989.4	15.63	-9.4E-07
B7	989.4	15.63	-9.4E-07
F7	989.3	15.75	-9.4E-07
B8	989.3	15.75	-9.4E-07
F8	989.3	15.50	-9.4E-07
B9	989.3	15.50	-9.4E-07
F9	989.2	15.59	-9.4E-07
B10	989.2	15.59	-9.4E-07
F10	988.9	15.48	-9.4E-07

Πίνακας 4.32 Υπολογισμός της μεταβολής d του δείκτη διάθλασης n εσωτερικής χωροστάθμησης

Τοποθετώντας στην σχέση 2.8 τους συντελεστές κάθε σκόπευσης όπως αυτοί προέκυψαν από την προσαρμογή του μοντέλου Reissmann 2, το

ύψος οργάνου την ανάγνωση της σταδίας καθώς και την οριζόντια απόσταση μεταξύ χωροβάτη και σταδίας προκύπτουν οι διορθώσεις λόγω διάθλασης για κάθε σκόπευση. Με τη χρήση του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων υπολογίστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab και το σφάλμα της διόρθωσης λόγω διάθλασης (Πίνακας 4.33). Έγινε η παραδοχή πως το σφάλμα της μεταβολής του συντελεστή διάθλασης d αλλά και το ύψος οργάνου προσδιορίστηκαν με μηδενικό σφάλμα.

	$C_R(\mu\text{m})$	$\sigma_{Cr}(\mu\text{m})$
B1	-0.65	30.22
F1	-2.05	34.96
B2	-1.95	33.46
F2	-0.47	2.57
B3	-0.43	2.33
F3	-1.28	20.99
B4	-0.99	16.24
F4	-0.22	1.80
B5	-0.18	1.46
F5	-1.84	23.82
B6	-1.72	22.25
F6	-0.14	3.23
B7	-0.19	4.44
F7	-1.73	32.48
B8	-1.82	34.29
F8	-1.00	5.07
B9	-1.16	5.85
F9	-1.84	7.00
B10	-2.24	8.53
F10	-0.78	1.95

Πίνακας 4.33 Διορθώσεις λόγω διάθλασης εσωτερικής χωροστάθμησης

Η συνολική διόρθωση λόγω διάθλασης στην τελική υψομετρική διαφορά της εσωτερικής χωροστάθμησης είναι $\sum_{i=1}^{10}(Cr_{Bi} - Cr_{Fi}) = +0.01\mu\text{m}$

Παρατηρείται ότι η συνολική διόρθωση λόγω διάθλασης είναι της τάξεως του $10^{-2}\mu\text{m}$ κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι η διάθλαση δεν είχε μεγάλη επίδραση στις αναγνώσεις της σταδίας από τον χωροβάτη.

Επίσης το σφάλμα υπολογισμού της διόρθωσης είναι αρκετά μεγάλο, μεγαλύτερο μάλιστα από την ίδια την τιμή της. Το γεγονός αυτό δείχνει πως η δεύτερη προσαρμογή του μοντέλου Reissmann 2, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των διορθώσεων λόγω διάθλασης με ικανοποιητική ακρίβεια. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός πως οι

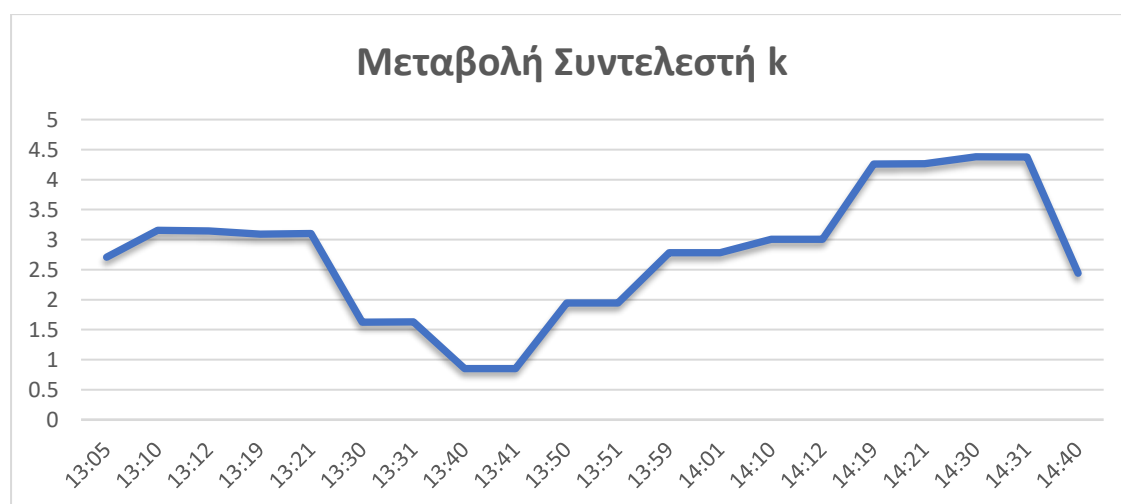
στατιστικοί έλεγχοι δεν ικανοποιούνται στο σύνολο των σκοπεύσεων της χωροστάθμησης.

4.6 Υπολογισμός συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης k

Από τις διορθώσεις λόγω διάθλασης μπορεί να υπολογισθεί ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k , σύμφωνα με την σχέση 2.13 για κάθε σκόπευση (Πίνακας 4.34).

B1	2.709
F1	3.155
B2	3.143
F2	3.092
B3	3.099
F3	1.622
B4	1.629
F4	0.852
B5	0.851
F5	1.946
B6	1.946
F6	2.781
B7	2.782
F7	3.007
B8	3.007
F8	4.259
B9	4.266
F9	4.380
B10	4.378
F10	2.442

Πίνακας 4.34 Συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης εσωτερικής χωροστάθμησης



Διάγραμμα 4.1 Μεταβολή Συντελεστή Γεωδαιτικής διάθλασης εσωτερικής χωροστάθμησης

Σύμφωνα με την σχέση 2.15 ο μέσος συντελεστής k της εσωτερικής χωροστάθμησης είναι 2.77.

Παρατηρείται μια μεγάλη διακύμανση του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης κατά την διάρκεια της εσωτερικής χωροστάθμησης η οποία διήρκτησε περίπου 1,5 ώρα (Διάγραμμα 4.1). Ο συντελεστής έχει θετικές τιμές όπως αναμενόταν λόγω του ότι η θερμοβαθμίδα είχε αρνητική τιμή. Λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι η διόρθωση λόγω διάθλασης είχε μεγάλο σφάλμα, έτσι και ο συντελεστής k υπολογίστηκε με εξίσου μεγάλο σφάλμα. Για τον λόγο αυτό οι τιμές αυτές δεν είναι αρκετά αξιόπιστες για να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικούς υπολογισμούς υψομετρικών διαφορών στην περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Συμπεράσματα

Κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι προσδιορισμός του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης k με την μέθοδο της θερμοβαθμίδας μέσω της διεξαγωγής σειράς πειραματικών διαδικασιών γεωμετρικής χωροστάθμησης ακριβείας.

Με αυτόν τον τρόπο, επιλέγοντας το κατάλληλο μοντέλο, μπορεί να διορθωθεί η χωροστάθμηση λόγω διάθλασης και να υπολογιστεί ο συντελεστής γεωδαιτικής διάθλασης k . Από την όλη διαδικασία εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψαν κάποια αξιοσημείωτα συμπεράσματα.

Κανένα από τα υπάρχοντα μοντέλα δεν ταιριάζει στις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διάρκεια των χωροσταθμήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Από την ανάλυση των δεδομένων θερμοκρασίας που κατέγραψαν οι αισθητήρες αλλά και από την προσαρμογή των υπάρχοντων μοντέλων σε αυτά, προκύπτει πως κανένα μοντέλο δεν περνά τους απαιτούμενους στατιστικούς ελέγχους στο σύνολο των σκοπεύσεων.

Δεδομένου ότι η θερμοβαθμίδα μεταβάλλεται από τόπο σε τόπο ακόμα και από στιγμή σε στιγμή, είναι πολύ πιθανό τα μοντέλα αυτά να μην βρίσκουν εφαρμογή σε διαφορετικές συνθήκες του περιβάλλοντος.

Επίσης φαίνεται πως δεν μπορεί το ίδιο μοντέλο να χρησιμοποιηθεί για την διόρθωση των χωροσταθμήσεων σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο. Ακόμη και κατά την πραγματοποίηση χωροστάθμησης σε εξωτερικό χώρο στον οποίο υπάρχει μεγάλη μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά την διάρκεια της, είναι πιθανό να χρειαστεί κάποιος συνδυασμός μοντέλων για την διόρθωση της λόγω διάθλασης.

Ορισμένα από τα μοντέλα, όπως τα πολυωνμικά μοντέλα του Reissmann, περνούσαν τους στατιστικούς ελέγχους σε περισσότερες από τις μισές σκοπεύσεις. Το μοντέλο Reissmann 2 ικανοποιούσε το 80% των σκοπεύσεων του εσωτερικού πειράματος, με την προσαρμογή χωρίς του

δυο χαμηλότερους αισθητήρες. Έτσι λοιπόν κρίθηκε πως η χωροστάθμηση θα μπορούσε να διορθωθεί με τη χρήση αυτού του μοντέλου. Στην πράξη αυτό αποδείχθηκε λάθος, καθώς η διόρθωση λόγω διάθλασης στις σκοπεύσεις υπολογίστηκε με μεγάλη αβεβαιότητα.

Παρόλο που το σφάλμα της διόρθωσης λόγω διάθλασης ήταν αρκετά μεγάλο, η τιμή της διόρθωσης κάθε σκόπευσης ήταν της τάξεως του 1μm. Η συνολική διόρθωση λόγω διάθλασης στην τελική υψομετρική διαφορά της εσωτερικής χωροστάθμησης ήταν της τάξεως του 10^{-2} μm. Αξίζει να σημειωθεί πως η συνολική διόρθωση έχει θετικό πρόσημο ενώ το σφάλμα κλεισίματος της χωροστάθμησης είναι επίσης θετικό.

Έτσι λοιπόν αντί να διορθώνεται η τελική υψομετρική διαφορά, μεγαλώνει ακόμα περισσότερο, ακόμη και αν η τιμή της διόρθωσης είναι αμελητέα.

Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η επίδραση της διάθλασης στην χωροστάθμηση ήταν σχεδόν μηδαμινή. Το γεγονός αυτό πιθανώς οφείλεται στις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν την στιγμή των μετρήσεων και την μορφή που είχε η θερμοβαθμίδα.

Η μικρή επίδραση της διάθλασης είναι επίσης πιθανό να οφείλεται στο ότι η κλίση του εδάφους στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι χωροσταθμίσεις ήταν μικρή και ομαλή. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η οπτική ακτίνα περνά από λίγα διαφορετικά ισοθερμικά στρώματα (Σχήμα 2.2), με αποτέλεσμα να υφίσταται πολύ μικρή εκτροπή στην πορεία της.

Παρατηρήθηκε επίσης το γεγονός ότι τα μοντέλα προσαρμόζονται καλύτερα στις μετρήσεις μετά την αφαίρεση των αισθητήρων που βρίσκονται κοντά στο έδαφος κυρίως στα εξωτερικά πειράματα. Συμπεραίνεται ότι η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει τους χαμηλούς αισθητήρες και κατ' επέκταση τον προσδιορισμό της θερμοβαθμίδας.

Επίσης ο υπολογισμός του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης έδειξε πως υπάρχει μεγάλη διακύμανση της τιμής του κατά την διάρκεια μιας χωροστάθμησης σε εξωτερικό χώρο. Ακόμη και ανάμεσα σε δυο διαδοχικές σκοπεύσεις η οποίες πραγματοποιούνται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα η τιμή μπορεί να έχει μεγάλη διαφορά.

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων και την προσαρμογή των μοντέλων σε αυτά, ένα μοντέλο θα κρίνεται κατάλληλο για υπολογισμό της διόρθωσης λόγω διάθλασης και του συντελεστή k , μόνο στην περίπτωση στην οποία περνά τους στατιστικούς ελέγχους στο σύνολο των σκοπεύσεων. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση θα κρίνεται ακατάλληλο, γιατί η διόρθωση και ο συντελεστής k θα προσδιορίζονται με μεγάλη αβεβαιότητα.

Συνοψίζοντας, η διαδικασία διόρθωσης των σκοπεύσεων μιας γεωμετρικής χωροστάθμησης και υπολογισμού του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης k με την μέθοδο της θερμοβαθμίδας, αποτελεί μια εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία.

Για την πραγματοποίηση της απαιτείται μια σειρά λεπτομερειών που πρέπει να τηρηθούν και ένα σύνολο σημείων στα οποία ο ερευνητής οφείλει να δώσει μεγάλη προσοχή.

Ο εξοπλισμός θα πρέπει να ανταποκρίνεται στις μεγάλες απαιτήσεις ακριβείας της συγκεκριμένης εργασίας ενώ ο εκτελεστής των πειραμάτων θα πρέπει να είναι πολύ έμπειρος και προσεκτικός ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία η όλη διαδικασία.

5.2 Προτάσεις

Από το σύνολο της μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και των συμπερασμάτων που προέκυψαν από αυτές, παρουσιάζεται μια σειρά προτάσεων για βελτίωση της όλης διαδικασίας αλλά και για περεταίρω έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι τα υπάρχοντα μοντέλα θερμοβαθμίδας δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε εφαρμογή γεωμετρικής χωροστάθμησης, είναι πολύ πιθανό να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διόρθωση των σκοπεύσεων και τον υπολογισμό του συντελεστή γεωδαιτικής διάθλασης k .

Έτσι λοιπόν, προτείνεται η δημιουργία ενός νέου μοντέλου το οποίο θα προσδιοριστεί με βάση τις συνθήκες της περιοχής. Το μοντέλο αυτό φυσικά

δεν μπορεί να προσδιοριστεί με τον μικρό αριθμό δεδομένων που προέκυψαν κατά την εκτέλεση των χωροσταθμίσεων. Θα πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για αρκετές μέρες, ανά τακτά διαστήματα ώστε να συλλεχθεί ένας ικανοποιητικός αριθμός δεδομένων για την δημιουργία του νέου αυτού μοντέλου.

Παράλληλα, οι αισθητήρες μέτρησης της θερμοκρασίας θα πρέπει να έχουν ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτή που παρείχαν οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Η μεγαλύτερη ακρίβεια θα δώσει την δυνατότητα στους ερευνητές να εντοπίζουν μικρότερες μεταβολές της θερμοκρασίας και κατά συνέπεια να μπορούν να διορθώσουν την μικρή επίδραση που θα έχει η διάθλαση στις μετρήσεις.

Για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας, είναι πολύ σημαντικό κατά την εκτέλεση των χωροσταθμίσεων να τηρηθούν τα σημεία που τονίσθηκαν στην παράγραφο 3.7.

Επίσης, το έδαφος στο οποίο θα πραγματοποιείται η χωροστάθμιση να έχει έντονη κλίση, ώστε η ακτίνα να περνά από πολλά διαφορετικά ισοθεμικά στρώματα. Αυτό σημαίνει πως η διάθλαση θα έχει μεγαλύτερη επίδραση στη χωροστάθμιση σε σχέση με αυτή που είχε στις εκτελεσθέντες χωροσταθμίσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης σκόπιμο κρίνεται οι διαθέσιμοι αισθητήρες της θερμοκρασίας να τοποθετούνται στην σταδία σε απόσταση μεγαλύτερη των 50cm από το έδαφος και να ισομοιράζονται στην υπόλοιπη σταδία. Με αυτόν τον τρόπο θα ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας του εδάφους στον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας, φαινόμενο το οποίο είναι έντονο σε εξωτερικό περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ., Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, Εκδόσεις Ζήτη, 2010
2. Hum S. V., Radio and Microwave Wireless Systems 2017
3. Zuccher S., Refraction of light, 2013
4. Κατσαφάδος Π., Μαυροματίδης Η., Αρχές Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας, 2010
5. Λαζαρίδης Μ., Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας. Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
6. Kharagani G., Propagation of refraction errors in trigonometric height traversing and geodetic levelling, 1987
7. Torge, W., Geodesy, Third completely revised and extended version. Berlin, 2001
8. Kalman Horvath, Untersuchung der Refraktion beim Präzisionsnivellement, 1995

ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

1. <https://el.wikipedia.org/wiki/Διάθλαση>
2. <http://www.env-edu.gr/>
3. <http://www.microstrain.com/>
4. <https://www.geminidataloggers.com/>
5. <https://rechneronline.de/earth-radius/>
6. <http://www.surveyequipment.com/>
7. <http://comet.ucar.edu/>